CIGB
ICOLD
CBDB

SEMANA DE BARRAGENS 2026

DAMSWEEK 2026

ANAIS

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

I SIMPÓSIO SOBRE
GRANDES
ESTRUTURAS
GEOTÉCNICAS

MENSAGEM DO PRESIDENTE

No ano de 2026, a Damsweek foi realizada na cidade de Belém, Estado do Pará, em plena Região Amazônica, no período imediatamente posterior à COP30 – Conferência das Partes organizada pela Organização das Nações Unidas (ONU), na qual importantes temas da agenda ambiental planetária foram debatidos e orientados, o que incluiu o desenvolvimento industrial sustentável e a gestão de recursos hídricos, matérias de especial interesse para a engenharia de barragens.

O Pará possui grandes estruturas de acumulação de água e de rejeitos, dentre as quais as UHEs Tucuruí e Belo Monte e estruturas de disposição de rejeitos de grandes mineradoras, o que inspirou o CBDB a promover um evento que aproximasse essas duas áreas da engenharia.

Com essa visão, a DAMSWEEK 2026 teve como objetivo fornecer um ambiente propício para a troca de ideias e o fomento do desenvolvimento da engenharia nacional em prol de barragens e estruturas de disposição de rejeitos seguras e ambientalmente sustentáveis.

A Damsweek 2026 abrigou, excepcionalmente, em sua programação, a reunião do INCA (ICOLD National Committees of the Americas), Clube Regional da Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB-ICOLD) para as Américas, organismo voltado ao desenvolvimento das melhores práticas científicas e técnicas relacionadas ao estudo, projeto, construção, operação e manutenção de barragens no continente americano. A presença internacional no evento buscou favorecer o intercâmbio de conhecimentos entre os participantes e o networking em favor da integração dos profissionais e das empresas dos vários países presentes.

A engenharia brasileira evoluiu e alcançou destaque internacional com a construção de grandes barragens, especialmente as de usinas hidrelétricas, e agora caminha a passos largos com a construção de grandes e complexas estruturas de disposição de rejeitos. Contudo, a troca de experiências entre os profissionais que atuam em barragens de acumulação de água e em estruturas de disposição de rejeitos ainda é tímida. Temos muito a compartilhar!



Miguel Augusto Zydan Sória
Presidente do CBDB
Comitê Brasileiro de Barragens

COMISSÃO ORGANIZADORA

Presidente da Comissão Organizadora

Teresa Cristina Fusaro	CBDB

Comissão Organizadora

Erlene Diogo Krajewski	Norte Energia
Amanda Damasceno	Hydro

NR Norte – Núcleo Regional do Norte

Adriano Frutuoso Da Silva	Diretor Regional
Marcos Vinicius Siqueira Santana	Vice-Diretor(a) Regional
Aarão Ferreira Lima Neto	Vice-Diretor(a) Técnico(a)
Fernanda Pereira Gouveia	Vice-Diretor(a) de Comunicações Regional
Katia de Oliveira Vieira	Vice-Diretor(a) Secretário(a) Regional

Diretoria do CBDB

Miguel Augusto Zydan Sória	Presidente
Teresa Cristina Fusaro	Vice-Presidente
José Marques Filho	Diretor Técnico
Cleber José de Carvalho	Diretor Administrativo e Financeiro
Diego Antônio Fonseca Balbi	Diretor de Publicações e Relações Institucionais

LOCAL DO EVENTO

BELÉM

PARÁ · BRASIL

LOCAL

Hangar Convenções & Feiras da Amazônia

Av. Dr. Freitas, s/n – Marco, Belém – PA
CEP 66613-902

DATAS

20 a 26 de setembro de 2026



REALIZAÇÃO **Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB**

TEMAS E RELATOS TÉCNICOS

A programação técnica da DAMSWEEK 2026 foi organizada em simpósios, workshops e reuniões.

GE.1	**Desafios técnicos no projeto de barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos** Relator(es): Maria Regina Moretti
GE.2	**Técnicas e inovações na construção de estruturas de barragens e TSFs** Relator(es): Ana Luisa Cezar Rissoli
GE.3	**Aspectos e práticas ambientais no projeto, construção, operação de barragens de acumulação de água** Relator(es): Ênio Fonseca
GE.3	**Aspectos e práticas ambientais no projeto, construção, operação e descaracterização de barragens e TSFs** Relator(es): Jonilton Paschoal
GE.4	**Modos de falha e Análise de riscos de estruturas geotécnicas** Relator(es): Lucas Samuel S. Brasil

SUMÁRIO

TEMA GE.1 – DESAFIOS TÉCNICOS NO PROJETO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

1 - RELATO DO TEMA..... 10

2 - ANÁLISE DE ESTABILIDADE COM ABORDAGEM PROBABILÍSTICA – CASO DA BARRAGEM DE TERRA DA MARGEM ESQUERDA DE ITAIPU..... 30

3 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE REJEITOS EMPILHADOS DE FORMA OPERACIONAL POR MEIO DE ENSAIOS CPTU..... 44

4 - ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO SOB CARREGAMENTOS DE TRÁFEGO NA CRISTA..... 54

5 - AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO DE DRENAGEM INTERNA EM BARRAGENS DE TERRA..... 74

6 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MATERIAIS DRENANTES SOB EXPOSIÇÃO PROLONGADA A RESIDUO DE BAUXITA..... 93

7 - COMO A METODOLOGIA BIM APLICADA AO DESIGN REVIEW PODE MELHORAR A CONFIABILIDADE, A EFICIÊNCIA DO PROCESSO E A VISUALIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES PROJETADAS PARA BARRAGENS DE REJEITOS..... 109

8 - COMPARAÇÃO ENTRE ANÁLISES POR EQUILÍBRIO LIMITE E ANÁLISES TENSÃO–DEFORMAÇÃO COM AUMENTO DE GRAVIDADE NA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE REJEITO..... 123

9 - DIRETRIZES PARA ESTIMATIVA DE ONDAS GERADAS PELO VENTO EM RESERVATÓRIOS: COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS EMPÍRICAS PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE BARRAGENS..... 141

10 - FREQUÊNCIA NATURAL DE BARRAGENS E PILHAS DE REJEITO: METODOLOGIA E APLICAÇÕES EM AVALIAÇÕES DINÂMICAS EM MINAS GERAIS..... 161

11 - INFLUÊNCIA DA INTERCALAÇÃO DE CAMADAS DELGADAS NA INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS CPTU APLICADOS A BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO..... 176

12 - MAPEAMENTO DA CONFORMAÇÃO DE FUNDO DE JUSANTE EM ENSAIOS DE MODELOS FÍSICOS DE BARRAGENS..... 196

13 - REVISÃO SOBRE A INFLUÊNCIA DO GRAU DE SATURAÇÃO NO PROCESSO DE LIQUEFAÇÃO EM SOLOS ARENOSOS NÃO SATURADOS..... 218

14 - SEGURANÇA HIDROLÓGICA EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO: CRITÉRIOS NACIONAIS E INTERNACIONAIS SOBRE VAZÕES DE PROJETO DE EXTRAVASORES E BORDA LIVRE MÍNIMA DE RESERVATÓRIOS..... 231

TEMA GE.2 – TÉCNICAS E INOVAÇÕES NA CONSTRUÇÃO DE ESTRUTURAS DE BARRAGENS E TSFS

1 - RELATO DO TEMA..... 247

2 - CONTROLE DE QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO DE UM ATERRO COMPACTADO DE UMA BARRAGEM..... 259

3 - CONTROLE TECNOLÓGICO E GOVERNANÇA NA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUO DE BAUXITA FILTRADO EM PILHA COM OPERAÇÃO ASSISTIDA..... 278

4 - ESTRUTURAÇÃO DE ACESSOS OPERACIONAIS EM PILHA DE RESÍDUOS COM LATERITA, ADAPTAÇÃO ÀS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS SAZONAIS..... 290

5 - IMPLANTAÇÃO DO FILTRO PRENSA E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUO DE BAUXITA FILTRADO: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO AMAZÔNICA..... 304

6 - OPERAÇÃO REMOTA COM ESCAVADEIRA ANFÍBIA NA LIMPEZA DE ESTRUTURAS IMPERMEABILIZADAS GARANTINDO SEGURANÇA HÍDRICA E HSE..... 317

7 - PICNÔMETRO A GÁS E PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE COMO ENSAIOS DE OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COMPACTAÇÃO DE REJEITO FILTRADO NA MINA BRUCUTU..... 333

8 - PROCESSO DE QA/QC ORIENTADO A DADOS PARA VERIFICAÇÃO CONTÍNUA DA ADERÊNCIA PROJETO X OBRA EM ESTRUTURA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS..... 348

9 - ZONEAMENTO DO REJEITO FILTRADO PARA MELHORAR ÍNDICE DE COMPACTAÇÃO EM UMA PILHA DE REJEITO..... 366

TEMA GE.3 – ASPECTOS E PRÁTICAS AMBIENTAIS NO PROJETO, CONSTRUÇÃO, OPERAÇÃO E DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS E TSFS

1 - RELATO DO TEMA – BARRAGENS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA..... 385

2 - RELATO DO TEMA – BARRAGENS E TSFS..... 397

3 - A EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DE DISPOSIÇÃO FINAL DO RESÍDUO DE BAUXITA PROVENIENTE DO PROCESSO BAYER: CRITÉRIOS TÉCNICOS E IMPLICAÇÕES DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL..... 409

4 - ANÁLISE DA ROBUSTEZ DA POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS À LUZ DA GOVERNANÇA DE UM EMPREENDIMENTO MULTIFUNCIONAL: O RAMAL DO AGRESTE..... 424

5 - ANÁLISE DOS EFEITOS DE PASS THROUGH ATRAVÉS DE CAMPANHAS TOPOBATIMÉTRICAS NO RESERVATÓRIO DA UHE AIMORÉS-MG..... 437

6 - DESCOMISSIONAMENTO DE BARRAGENS DE MÚLTIPLOS USOS: ABORDAGEM REGULATÓRIA EM DESENVOLVIMENTO NO ESTADO DE SÃO PAULO..... 457

7 - FERRAMENTAS ESTRATÉGICAS DE COMUNICAÇÃO PARA INFORME DA VARIAÇÃO DE VAZÃO DEFLUENTE AS POPULAÇÕES A JUSANTE DA UHE BELO MONTE..... 469

8 - GESTÃO AMBIENTAL E SEGURANÇA DE BARRAGENS COMO TEMAS MATERIAIS EM RELATÓRIOS DE SUSTENTABILIDADE DA UHE TUCURUÍ..... 486

9 - GESTÃO AMBIENTAL E SOCIOPATRIMONIAL DAS APPS DOS RESERVATÓRIOS DA UHE BELO MONTE COMO INSTRUMENTO ESTRATÉGICO DE SEGURANÇA OPERACIONAL DA USINA..... 505

10 - GESTÃO DE RISCO EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA ENCHENTES COM DIQUES..... 515

11 - GESTÃO DINÂMICA DE RISCO HIDROLÓGICO DURANTE OBRAS DE ADEQUAÇÃO DE EXTRAVASORES EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO..... 529

12 - GESTÃO E ADAPTAÇÃO DOS ELEMENTOS DE AUTOPROTEÇÃO E EVACUAÇÃO DE COMUNIDADES INDÍGENAS SITUADAS EM ZONAS DE AUTOSSALVAMENTO DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO.....547

13 - IMPLANTAÇÃO DE GRADES ANTICARDUMES COMO BOA PRÁTICA AMBIENTAL NA OPERAÇÃO DA UHE BELO MONTE.....567

14 - MODELAGEM APLICADA À AVALIAÇÃO DE IMPACTO VISUAL EM PROJETOS GEOTÉCNICOS.....579

15 - MORCEGOS DE PEDRAIS EM ESTRUTURAS ARTIFICIAS CRIADAS PELA UHE BELO MONTE.....596

16 - PRÁTICAS DE GESTÃO AMBIENTAL NA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS EM GRANDES RESERVATÓRIOS: CASO DA BARRAGEM DE REJEITO DE COBRE DO SOSSEGO.....605

17 - PROBLEMÁTICA NO TRATAMENTO DE PATOLOGIAS EM BARRAGENS DE TERRA, DURANTE PERÍODO DE INVERNO AMAZÔNICO – EXEMPLO DA REGIÃO DE PARAGOMINAS/PA.....618

18 - PROJETO MÃOS QUE TRANSFORMAM: EDUCAÇÃO AMBIENTAL NA CAPACITAÇÃO DE MULHERES EM REASSENTAMENTOS RURAIS IMPLANTADOS PELA UHE BELO MONTE.....629

19 - PROPOSIÇÃO METODOLÓGICA PARA MELHORIA DO MONITORAMENTO PLUVIOMÉTRICO EM REGIÕES DE BARRAMENTO COM ESCASSEZ DE POSTOS.....641

20 - RECUPERAÇÃO DE ENCOSTAS E REABILITAÇÃO ECOLÓGICA NO ÂMBITO DO PRAD DA UHE BELO MONTE.....661

21 - REMOÇÃO DE BARRAGENS – MÉTODOS PARA TOMADA DE DECISÃO E ESTUDOS DE CASO AO REDOR DO MUNDO.....674

22 - RESPOSTAS ECOLÓGICAS À IMPLANTAÇÃO DE RESERVATÓRIO DE HIDRELÉTRICA: ANÁLISE DE LONGO PRAZO (1997–2024) NO RIO PIRACICABA (MG, BRASIL).....692

23 - SENSIBILIZAÇÃO DE COMUNIDADES RIBEIRINHAS PARA A CONSERVAÇÃO DA FAUNA AMAZÔNICA DO ENTORNO DA UHE BELO MONTE.....710

24 - SUPRESSÃO DE VEGETAÇÃO NA ÁREA DE INFLUÊNCIA - PÉ DA BARRAGEM DA UHE CAMARGOS.....718

25 - USO FUTURO COMO VARIÁVEL ESTRATÉGICA NO CICLO DE VIDA DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS: DIRETRIZES PARA PROJETO, OPERAÇÃO, FECHAMENTO E PÓS-FECHAMENTO.....733

26 - VOLUME ESPERA EM RESERVATÓRIO FIO D'ÁGUA PARA ELIMINAR HIDROPICOS - EXPERIÊNCIA DO COMPLEXO BELO MONTE.....749

TEMA GE.4 – MODOS DE FALHA E ANÁLISE DE RISCOS DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

1 - ANÁLISE DAS CONSEQUÊNCIAS DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE MINERAÇÃO UTILIZANDO A FERRAMENTA DE RISCOS BOW TIE.....758

2 - ANÁLISE DE MODOS DE FALHA POTENCIAIS EM BARRAGENS DE TERRA: UMA ABORDAGEM FMECA APLICADA A INTERVENÇÕES DE JUSANTE.....777

3 - ANÁLISE DE RISCO BASEADO NO ESTADO DE CONSISTÊNCIA COMO FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO: UM ESTUDO DE 19 BARRAGENS NO CEARÁ.....790

4 - ANÁLISE DE RISCO ELABORADA PARA EROSÕES IDENTIFICADAS EM PÁTIO DE HOMOGENEIZAÇÃO.....807

5 - APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS DE RISCO EM BARRAGENS DE REJEITOS: DESAFIOS PRÁTICOS E LIÇÕES APRENDIDAS.....815

6 - AVALIAÇÃO DE RISCOS EM BARRAGEM DE CONCRETO E BARRAGEM DE TERRA POR METODOLOGIA FMEA..... 830

7 - CLASSIFICAÇÃO DE RISCOS EM BARRAGEM DE TERRA PELAS METODOLOGIAS BOW-TIE E FMEA..... 848

8 - COGNITIVE BIASES AND INSTITUTIONAL FAILURE – DECISION-MAKING UNDER DEEP UNCERTAINTY BEFORE THE 1953 NETHERLANDS FLOOD DISASTER- PARALLELS WITH THE GLOBAL MINE DAMS AND TAILINGS INDUSTRY..... 867

9 - COMO ABORDAGENS BASEADAS EM RISCO MELHORAM A SEGURANÇA DE BARRAGENS: EXEMPLOS E LIÇÕES APRENDIDAS GLOBAIS..... 887

10 - COMPARATIVE ANALYSIS OF FMEA AND FAULT AND EVENT TREE APPROACHES APPLIED TO THE INTERNAL EROSION FAILURE MODE..... 907

11 - GESTÃO DE RISCOS EM PILHAS DE REJEITO SUSCETÍVEL À LIQUEFAÇÃO: INTEGRAÇÃO DE FMEA, CONTROLES CRÍTICOS E ISO 30.000..... 923

12 - INFLUÊNCIA METODOLÓGICA DOS ENSAIOS REOMÉTRICOS EM ESTUDOS DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE BARRAGENS DE REJEITOS..... 942

13 - INTERFERÊNCIAS GEOTÉCNICAS ENTRE ESTRUTURAS DE MINERAÇÃO: LIÇÕES DE ESTUDOS DE CASO E IMPLICAÇÕES PARA O PLANEJAMENTO INTEGRADO..... 950

14 - MODELAGEM DE CONFIABILIDADE MULTIVARIADA INTEGRADA EM BARRAGENS DE REJEITOS: APLICAÇÃO DO FRAMEWORK DRIFT – ESTUDO DE CASO..... 967

15 - MODELAGEM INTEGRADA DE RISCO ESTRUTURAL E ECONÔMICO PARA APOIO À DECISÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM TÚNEIS HIDRÁULICOS..... 987

16 - POSSIBILIDADES PARA DEFINIÇÃO DE ZONA ALARP: FUNDAMENTOS CONCEITUAIS, ASPECTOS REGULATÓRIOS E BOAS PRÁTICAS INTERNACIONAIS..... 1001

17 - PROPOSTA DE NORMA TÉCNICA SOBRE GESTÃO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS E VALES A JUSANTE..... 1008

18 - SEISMIC HAZARD ASSESSMENT FOR DAM SAFETY AT THE SERRA DA MESA DAM, BRAZIL: A PROBABILISTIC AND DETERMINISTIC ANALYSIS..... 1026

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

SEMANA DE BARRAGENS 2026
DAMSWEEK 2026

Desafios técnicos no projeto de barragens e estruturas de disposição de rejeitos

Regina Moretti

Relato do tema GE.1
21 de setembro de 2026

Agradecimentos

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Aos colegas que contribuíram
para a análise dos trabalhos

Rodrigo Rodrigues Vieira de Oliveira

Gerson Vieira de Oliveira

Adriano Frutuoso da Silva

Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

“REGRA DE OURO“ PARA PROJETO DE BARRAGENS

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

RECOMENDAÇÃO DO REPRESENTANTE DA CONTRATANTE PARA O PROJETO DE BOACICA, AL, NOS IDOS DO SÉCULO XX:

“Eu quero uma barragem que não dê problemas.”





O projeto não deu problemas, mas a falta de manutenção...

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS



A responsabilidade mínima do projetista

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

- **Atender à melhor técnica**

Princípios e critérios consagrados, conhecimento técnico consolidado e atualizado, e uso de ferramentas adequadas

- **Considerar condições específicas**

Características físicas, bióticas e socioeconômicas.
Função e porte do empreendimento

- **Integração das especialidades**

Compatibilidade entre soluções e interfaces

- **Considerar aspectos construtivos e de longo prazo**

Facilidade de construção, operação e manutenção

- **Prazo e custo**
- **Identificar outras condições de adversidade e oportunidade**

O que é uma grande estrutura geotécnica?

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Barragem de terra ou enrocamento:	**Altura > 300 m ?**
Barragem:	**Extensão > 60 km ?**
Pilha de rejeitos compactados:	**Altura > 300 m ?**
Barragem de rejeitos alteada para montante: altura	**Altura> 200 m?**

Tamanho é documento?

Grande barragem segundo a ICOLD

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

- **Altura de 15 m ou mais**
  Altura medida do ponto mais baixo da fundação até a crista

OU

- **Altura entre 5 e 15 m e reservatório com mais de 3 milhões de m³**

Fonte: ICOLD, Definition of a Large Dam

Enquadramento na PNSB

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Basta atender a um dos critérios da lei

Altura	15 m ou mais, do pé do talude de jusante ao coroamento
Capacidade	Reservatório com 3 milhões de m³ ou mais
Conteúdo	Reservatório com resíduos perigosos
DPA	Médio ou alto
Categoria de risco	Alta, a critério do órgão fiscalizador

Fonte: Lei nº 12.334/2010, art. 1º, com as alterações da Lei nº 14.066/2020

Porte, dano potencial e categoria de risco

Aspecto	Pergunta	Referência
Porte	Quais são as dimensões da estrutura?	Altura, volume e extensão
DPA	Quais seriam as consequências de uma falha?	Baixo, médio ou alto
CRI	Quais condições influenciam a possibilidade de acidente?*	Baixa, média ou alta

* Leva em conta o porte do empreendimento

Categoria de risco: quem classifica e como

Quem classifica
O órgão fiscalizador competente, segundo os critérios gerais do CNRH.

O que se avalia
Características técnicas, conservação e atendimento ao Plano de Segurança.

Resultado
Categoria de risco baixa, média ou alta.

Onde se aplica
Barragens de água, de rejeitos e de resíduos, conforme a competência legal.

Fontes: Lei nº 12.334/2010, arts. 5º e 7º; Resolução CNRH nº 241/2024, arts. 3º e 7º

ANM: categoria de risco em 2027

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Nova classificação a partir de 2 de agosto de 2027

01 Risco geral

02 Percolação e conservação

03 Galgamento

04 Gerencial

05 Falta de aderência ao projeto

Prevalece o pior dos cinco indicadores

CRI baixa, média ou alta

Fonte: Resolução ANM nº 220/2025, Anexo I; calendário alterado pela nº 245/2026

ANM: níveis de segurança em 2027

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

A partir de 2 de agosto de 2027

Normal	Ausência de condição que possa comprometer a segurança
Atenção	Condição que pode comprometer a segurança se agravada
Alerta	Segurança comprometida, exigindo providências imediatas
Crítico	Alta probabilidade de acidente ou desastre
Emergência	Ruptura iminente, inevitável ou em curso

Alerta, Crítico ou Emergência determinam CRI alta.

Fonte: Resolução ANM nº 220/2025, arts. 13 e 15; vigência conforme nº 245/2026

Afinal tamanho é documento?

- Porte é documento (afeta o CRI)
- Dano potencial é documento,
- Conservação é documento,
- Registros são documento,
- Etc.

O Tejo é mais belo que o rio que corre pela minha aldeia,
Mas o Tejo não é mais belo que o rio que corre pela minha aldeia
Porque o Tejo não é o rio que corre pela minha aldeia...

Fernando Pessoa

Itaipu é mais bela que a barragem que eu projeto em alguma aldeia,
Mas itaipu não é mais bela que a barragem que eu projeto em alguma aldeia
Porque Itaipu não é a barragem que eu projeto em alguma aldeia..

Todas as barragens que são projetadas são grandes!!!!!

Trabalhos do tema GE.1

14 trabalhos analisados

Cinco terão apresentação oral nesta sessão

Rejeitos
Filtros e drenagem
Hidrologia e hidráulica
Modelos numéricos e indicadores de segurança
Modelo físico
Ferramentas para controle de projeto

T02 · Análise do comportamento de rejeitos empilhados de forma operacional por meio de ensaios CPTu

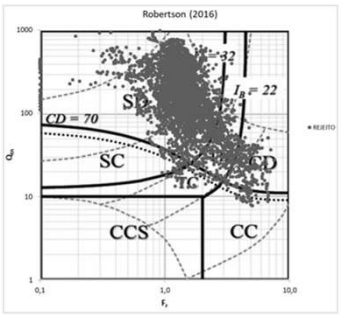
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Faria, Cardoso e Barony Artigo 3116996

Objetivo
Verificar o comportamento dos rejeitos após o empilhamento.

Método
7 CPTu em rejeitos dispostos em camadas de 50 cm com trator D6.

Resultado do estudo
Os CPTu indicaram predomínio de comportamento dilatante.



Comportamento interpretado pelo CPTu

Contribuição: Verificação de campo de um procedimento operacional.

Faria et al., pp. 3–5 e 7–10; Tabela 2 e Figura 5

T02 · Ensaio CPTu no empilhamento

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Faria, Cardoso e Barony Artigo 3116996



Investigação de campo nos rejeitos empilhados

7 ensaios CPTu

Rejeitos dispostos em camadas de 50 cm com trator D6

Faria, Cardoso e Barony. Figura 3, p. 6. Artigo 3116996.

T09 · Influência da intercalação de camadas delgadas na interpretação de ensaios CPTu aplicados a barragens de rejeitos de minério de ferro

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

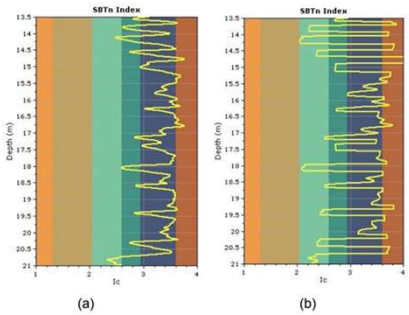
Ferrarez, Lanza, Paes e Villar Artigo 9234364

Apresentação oral

Objetivo
Examinar o efeito de camadas finas na interpretação do CPTu.

Método
15 CPTu em duas barragens, comparados antes e após a correção.

Resultado do estudo
A correção aumentou a dispersão das resistências estimadas.



Perfil antes (a) e depois (b) da correção

Contribuição: Efeito das camadas vizinhas sobre a leitura do cone.

Ferrarez et al., Figura 5, p. 11; resultados e conclusões, pp. 15–18

T11 · Revisão bibliográfica sobre a influência do grau de saturação na liquefação de solos arenosos não saturados por meio de ensaios triaxiais cíclicos

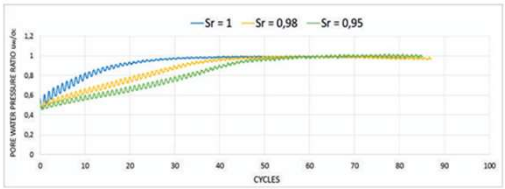
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Melo, Basílio e Borges Artigo 1746082

Objetivo
Reunir estudos sobre saturação e liquefação cíclica de areias.

Método
Revisão de ensaios com diferentes areias e estados iniciais.

Resultado do estudo
A saturação parcial pode retardar a liquefação cíclica.



Exemplo de ensaio citado na revisão

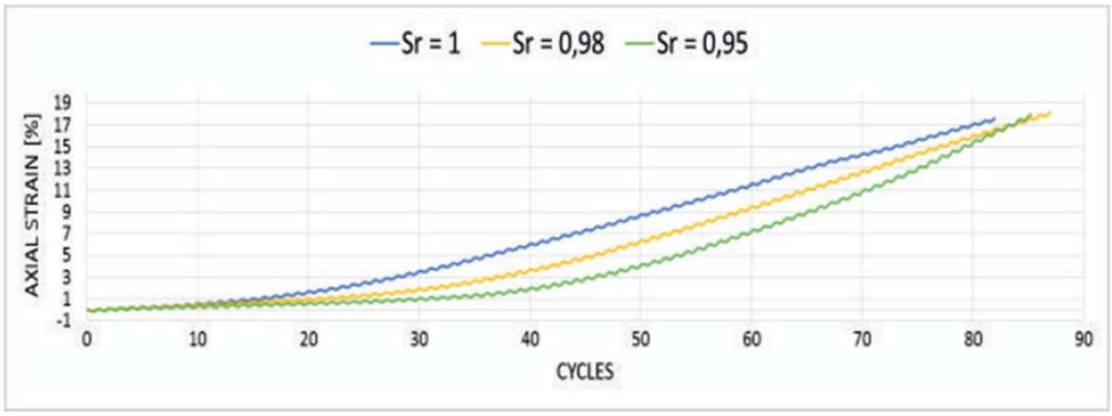
Contribuição: Discussão do efeito da presença de ar nos vazios.

Melo et al., Figura 1, p. 7; Tabela 3, p. 10; discussão, pp. 11–12

T11 · Saturação e evolução das deformações

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Melo, Basílio e Borges Artigo 1746082



Deformação axial ao longo dos ciclos, para três graus de saturação

Melo, Basílio e Borges. Figura 2, p. 7. Artigo 1746082.

T03 · Comparação entre análises por equilíbrio limite e análises tensão–deformação com aumento de gravidade na avaliação da estabilidade de barragens de rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Paes e Fayer Artigo 4052608

Apresentação oral

Objetivo

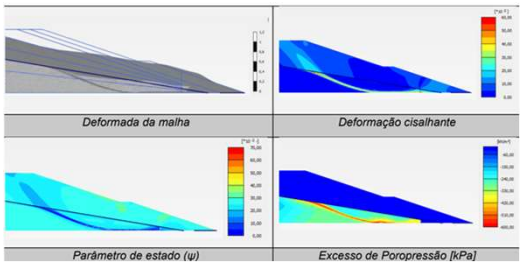
Comparar equilíbrio limite e análise de tensão e deformação.

Método

Cinco níveis freáticos e simulação com aumento da gravidade.

Resultado do estudo

A elevação do nível freático reduziu os indicadores de estabilidade.



Resultados da análise de tensão e deformação

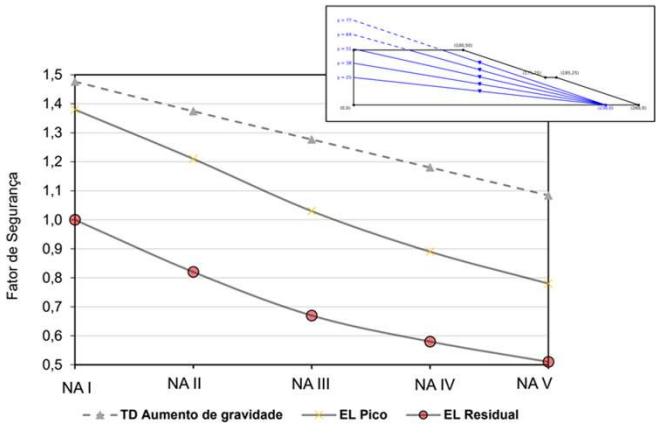
Contribuição: O modelo mostra a progressão das deformações.

Paes e Fayer, Figura 7, p. 13; método, pp. 9–11; comparação, pp. 15–17

T03 · Comparação dos indicadores de estabilidade

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Paes e Fayer Artigo 4052608



Resultados apresentados para os cinco níveis freáticos

Paes e Fayer. Figura 9, p. 16. Artigo 4052608.

T04 · Análise numérica do comportamento geotécnico de barragens de terra e enrocamento sob carregamentos de tráfego na crista

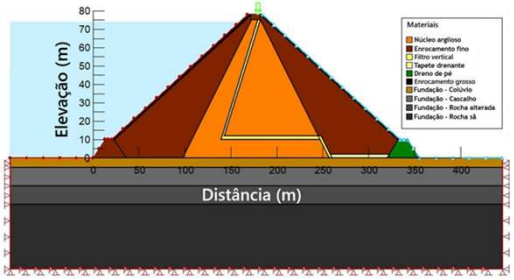
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Souza, Santos Neta, Moreira e Moreira Artigo 3442904

Objetivo
Avaliar os efeitos de cargas de tráfego na crista.

Método
Modelo 2D com cargas estáticas de 10, 20 e 50 kPa.

Resultado do estudo
O estudo destaca efeitos locais no topo do núcleo.



Seção do modelo numérico

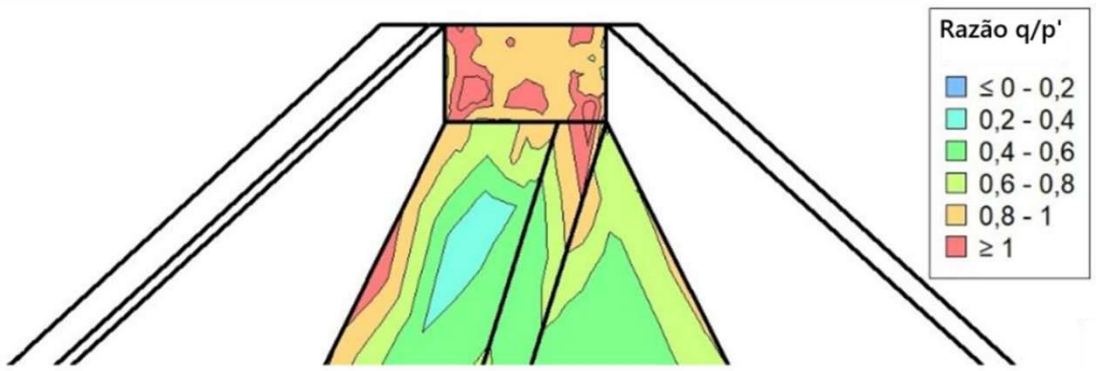
Contribuição: Atenção às interfaces entre materiais da barragem.

Souza et al., Figura 1, p. 3; método, pp. 4–5; Tabela 7 e conclusões, pp. 17–18

T04 · Tensões no topo do núcleo

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Souza, Santos Neta, Moreira e Moreira Artigo 3442904



Razão de tensões q/p′ sob carregamento estático de 50 kPa

Souza, Santos Neta, Moreira e Moreira. Figura 9, p. 15. Artigo 3442904.

T07 · Análise de estabilidade com abordagem probabilística: caso da barragem de terra da margem esquerda de Itaipu

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Assis, Nogueira, Rodrigues, Rodrigues e Patias Artigo 1048259

Apresentação oral

Objetivo
Avaliar a estabilidade de uma seção da BTME de Itaipu pelo método probabilístico

Método
Ensaios de resistência e análise probabilística do talude.

Resultado do estudo
Baixa probabilidade de instabilidade no caso analisado.



Seção analisada	BTME
Altura	10,5 m
Fundação	3 blocos / 33 ensaios

Contribuição: Inclusão da variabilidade da resistência no cálculo.

Assis et al., Figura 3, p. 5; Tabela 2, p. 9; método e resultados, pp. 10–12

T07 · A barragem de terra no conjunto de Itaipu

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Assis, Nogueira, Rodrigues, Rodrigues e Patias Artigo 1048259



Localização da barragem de terra da margem esquerda

Assis, Nogueira, Rodrigues, Rodrigues e Patias. Figura 2, p. 5. Artigo 1048259.

T08 · Frequência natural de barragens e pilhas de rejeito: metodologia e aplicações em avaliações dinâmicas em Minas Gerais

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

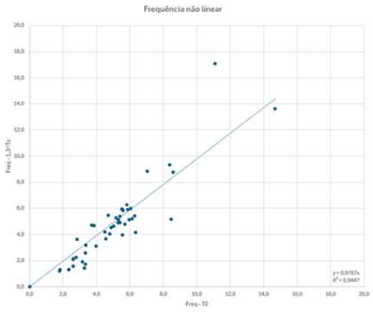
Cruz, Mesavilla, Secco, Gomes e Sant'Ana Artigo 5977234

Apresentação oral

Objetivo
Estimar frequências naturais de barragens e pilhas.

Método
Duas formulações aplicadas a 46 seções de projeto.

Resultado do estudo
Os autores identificam forte correlação entre as estimativas.



Comparação entre as duas estimativas

Contribuição: Banco com 38 seções de barragens e oito de pilhas.

Cruz et al., Tabela 1, pp. 6–8; figura, p. 10; Tabela 2 e conclusão, p. 11

T05 · Avaliação de métodos para dimensionamento de drenagem interna em barragens de terra

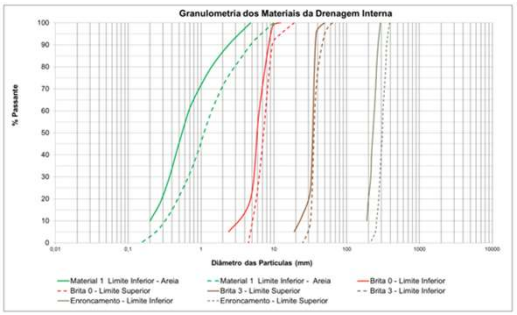
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Basílio, Viana, Andalicio, Casazza e Queiroz Artigo 7722711

Objetivo
Comparar critérios para filtros e drenagem interna.

Método
Cálculo de vazão e comparação das faixas granulométricas.

Resultado do estudo
As espessuras adotadas superam os mínimos necessários para dar vazão



Faixas granulométricas dos materiais

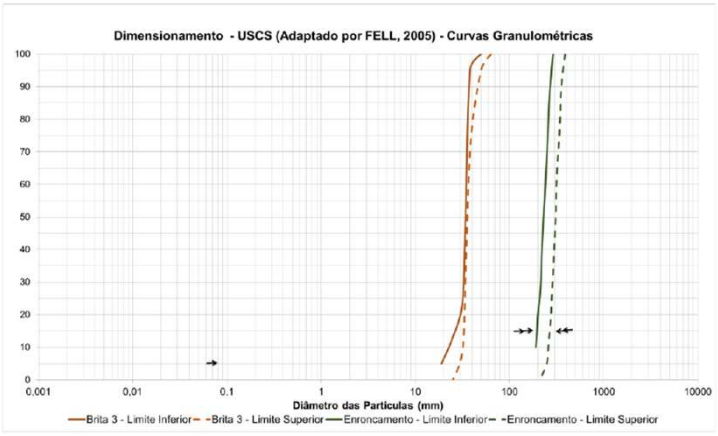
Contribuição: Compatibilidade entre os materiais em contato.

Basílio et al., pp. 9–10, Figura 7, p. 13, e conclusões, p. 17

T05 · Transição entre brita e enrocamento

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Basílio, Viana, Andalicio, Casazza e Queiroz Artigo 7722711



Faixa granulométrica adotada para a transição 4

Basílio, Viana, Andalicio, Casazza e Queiroz. Figura 6, p. 13. Artigo 7722711.

T01 · Avaliação do desempenho de materiais drenantes sob exposição prolongada ao efluente do resíduo de bauxita

Ciuffi, Gomes, Costa, Santos e Pantoja Artigo 5582772

Apresentação oral

Objetivo

Avaliar areia e brita em contato com efluente de bauxita.

Método

Ensaios em colunas por 151 a 163 dias.

Resultado do estudo

A permeabilidade diminuiu nos materiais ensaiados.

Após o contato com o efluente

Material	Redução de k
Areia	46,4%
Brita 1	17,9%

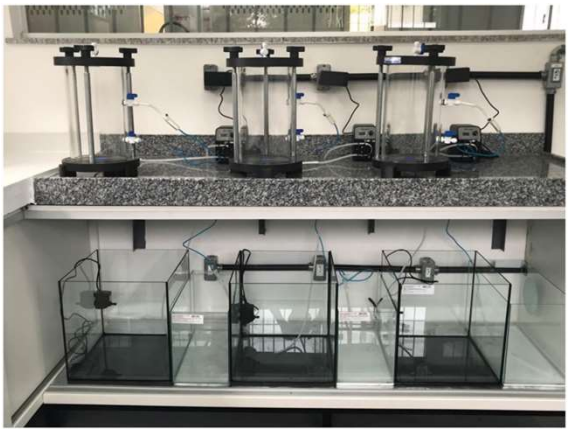
k = coeficiente de permeabilidade

Contribuição: Medição antes e depois do contato com o efluente.

Ciuffi et al., Tabelas 2–3, pp. 10 e 13; exposição, pp. 10–13; conclusões, p. 14

T01 · Ensaio dos materiais drenantes

Ciuffi, Gomes, Costa, Santos e Pantoja Artigo 5582772



Montagem de laboratório apresentada no artigo

Ciuffi, Gomes, Costa, Santos e Pantoja. Figura 1, p. 5. Artigo 5582772.

Areia e brita

Exposição ao efluente por 151 a 163 dias

T06 · Diretrizes para estimativa de ondas geradas pelo vento em reservatórios: comparação de metodologias empíricas para aplicação em projetos de barragens

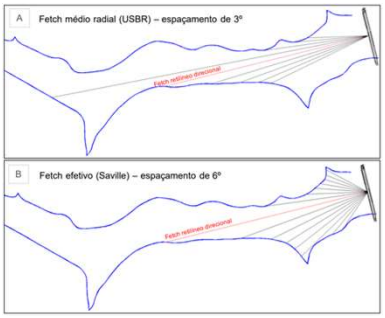
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Lisboa, Carvalho e Duarte Artigo 6380930

Objetivo
Comparar métodos de previsão de ondas de vento.

Método
Quatro métodos aplicados a um reservatório em Goiás.

Resultado do estudo
A escolha do fetch alterou a comparação dos resultados.



Formas de determinar o fetch

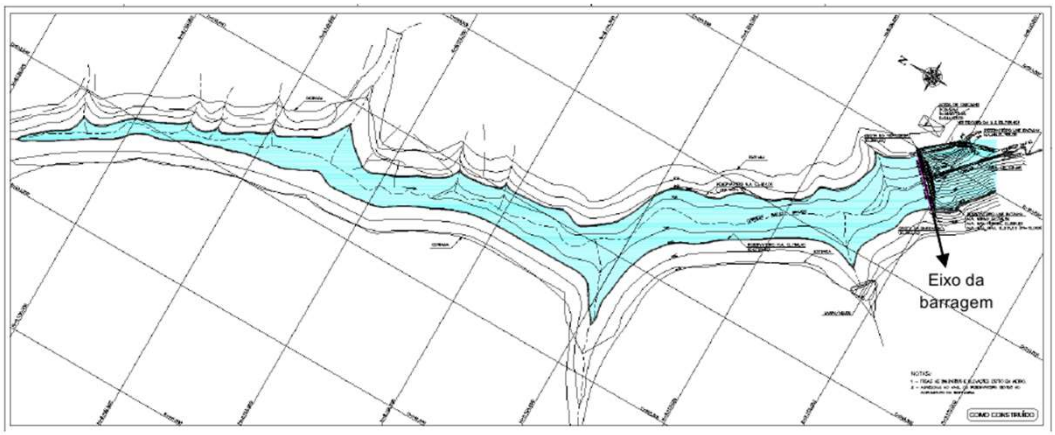
Contribuição: Importância da distância de atuação do vento sobre a água.

Lisboa et al., Figura 2, p. 6; Tabela 2, p. 12; discussão, pp. 13–17

T06 · Geometria do reservatório estudado

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Lisboa, Carvalho e Duarte Artigo 6380930



Contorno do reservatório e posição da barragem

Lisboa, Carvalho e Duarte. Figura 1, p. 4. Artigo 6380930.

T12 · Segurança hidrológica em barragens de mineração: critérios nacionais e internacionais sobre vazões de projeto de extravasores e borda livre mínima de reservatórios

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Bueno e Meirelles Artigo 1271654

Objetivo
Comparar critérios de cheia de projeto e borda livre.

Método
Revisão bibliográfica de normas e diretrizes nacionais e internacionais.

Resultado o estudo
Organiza critérios por consequência e fase da estrutura.

Referências examinadas

Brasil	Internacionais
ANM	ICOLD / CDA
ABNT NBR 13.028	ANCOLD / GISTM

Contribuição: Reunião de referências para a segurança hidrológica.

Bueno e Meirelles, metodologia, p. 4; Tabela 7 e discussão, pp. 12–14

T10 · Mapeamento da conformação de fundo de jusante em ensaios de modelos físicos de barragens

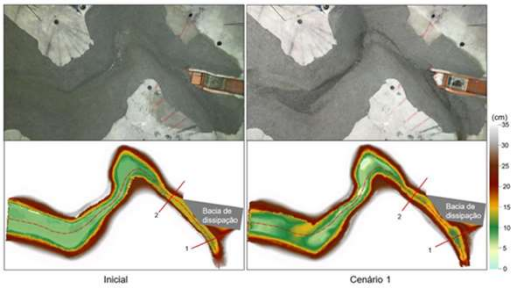
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Martins, Bezerra, Silva, Martins e Bernardino Artigo 4800303

Objetivo
Mapear o fundo após ensaios de erosão em modelo físico.

Método
Câmera e sensores de nível em um modelo na escala 1:40.

Resultado do estudo
O método reproduziu as principais feições do fundo.



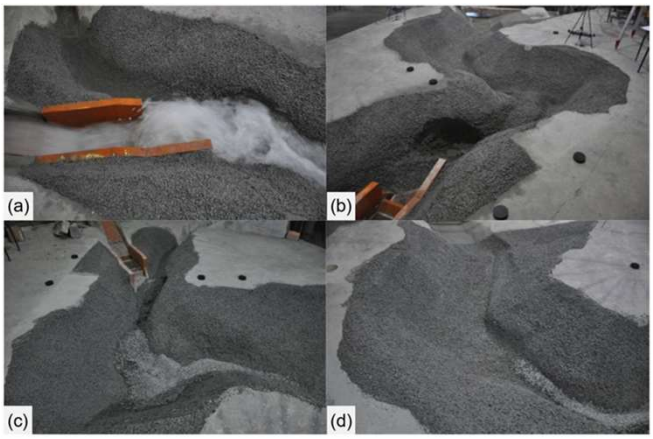
Fundo do modelo antes e depois do ensaio

Contribuição: Aquisição dos dados em até 90 minutos.

Martins et al., Figura 3.2, p. 13; limitações e incertezas, pp. 16–19

T10 · Ensaio no modelo físico

Martins, Bezerra, Silva, Martins e Bernardino Artigo 4800303



Geometria da erosão e cavidade reentrante observada no ensaio

Martins, Bezerra, Silva, Martins e Bernardino. Figura 3.7, p. 16. Artigo 4800303.

T13 · Aplicação da metodologia BIM no processo de Design Review em projetos de barragens de rejeitos

Souza e Santos Junior Artigo 6370885

Objetivo
Aplicar BIM à revisão de um projeto de barragem.

Método
Modelo digital e acompanhamento das recomendações.

Resultado do estudo
Registro de 181 recomendações em três meses.

181
recomendações registradas

3 meses
de acompanhamento

Contribuição: Rastreabilidade das recomendações no modelo digital.

Souza e Santos Junior, Figura 1, p. 10; método e resultados, pp. 8–12

T13 · Recomendações localizadas no modelo

Souza e Santos Junior Artigo 6370885



Exemplo de registro no ambiente comum de dados

Souza e Santos Junior. Figura 1, p. 10. Artigo 6370885.

Observação 1:

As Barragens estão preferindo participar anonimamente dos artigos a serem publicados:

Situação	Trabalhos
Não informam o nome da estrutura estudada	7
Identificam pelo nome — Itaipu	1
Não se aplica	5
Total	13

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Outras observações:

Os trabalhos apresentados são, em sua maioria, modelagens, estudos de laboratório, análises complementares e síntese de dados.

Apenas um trabalho traz caso real.

Será que não se faz mais projetos que sejam aplicados e verificados quanto a suas hipóteses?

Onde estão os projetos atuais?

Quais são os desafios que vêm sendo enfrentados?

That´s all, folks!



CIGB ICOLD CBDB

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609

Comitê Brasileiro de Barragens
I Simpósio sobre Grandes Estruturas Geotécnicas
Tema GE.1
Belém – PA, 21 e 22 de setembro de 2026

ANÁLISE DE ESTABILIDADE COM ABORDAGEM PROBABILÍSTICA – CASO DA BARRAGEM DE TERRA DA MARGEM ESQUERDA DE ITAIPU

Higor Biondo de ASSIS
Mestre - UNESP

Caio Gorla NOGUEIRA
Doutor – UNESP

Roger Augusto RODRIGUES
Doutor – UNESP

Rodrigo de Lima RODRIGUES
Mestre – Itaipu Parquetec

Josiele PATIAS
Doutora – Itaipu Binacional

RESUMO

As análises de estabilidade de taludes com abordagem probabilística incorporam as incertezas dos materiais e processos geotécnicos por meio da consideração de distribuições estatísticas dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, em contraste com os valores médios adotados em análises determinísticas. A aplicação de ferramentas estatísticas permite estimar a probabilidade de ruptura, parâmetro fundamental para a avaliação do risco associado à instabilidade de taludes. No contexto da Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu, a abordagem probabilística foi aplicada na análise de estabilidade do talude de jusante da seção correspondente à Estaca 135+50. Para o desenvolvimento das análises probabilísticas, foram empregados dados provenientes dos ensaios de controle de qualidade executados durante a construção do maciço compactado, complementados por campanhas adicionais de amostragem do material de fundação e execução de 33 ensaios triaxiais, visando à caracterização da variabilidade dos parâmetros geotécnicos. O tratamento estatístico dos dados foi realizado por meio do Método de Regressão Linear Modificado (MLRM). As análises de estabilidade probabilísticas foram realizadas com o auxílio do programa computacional Risk Assessment Applied to Slope Stability (RASS). Os resultados obtidos indicaram uma probabilidade de falha da ordem de 10^{-13}, valor considerado baixo quando interpretado à luz das referências técnicas disponíveis.

ABSTRACT

Probabilistic slope stability analyses incorporate the uncertainties associated with geotechnical materials and processes by taking into account the statistical distributions of shear strength parameters, in contrast to the mean values used in deterministic analyses. The application of statistical tools allows the probability of failure to be estimated, a fundamental parameter for assessing the risk associated with slope instability. In the context of the Itaipu Left Bank Earth Dam, the probabilistic approach was applied to the stability analysis of the downstream slope of the section corresponding to Pile 135+50. For the development of the probabilistic analyses, data from quality control tests carried out during the construction of the compacted embankment were used, supplemented by additional sampling campaigns of the foundation material and the performance of 33 triaxial tests, aimed at characterising the variability of the geotechnical parameters. Statistical analysis of the data was performed using the Modified Linear Regression Method (MLRM). Probabilistic stability analyses were carried out using the Risk Assessment Applied to Slope Stability (RASS) software. The results obtained indicated a failure probability of approximately 10^{-13}, a value considered low when interpreted in the light of available technical references.

1. INTRODUÇÃO

As avaliações de desempenho de barragens, tradicionalmente baseadas na interpretação de dados de instrumentação e em inspeções visuais, constituem uma ferramenta fundamental para o acompanhamento do comportamento dessas estruturas. Esses dados são, em geral, analisados por profissionais especializados que, com base no julgamento de engenharia, emitem pareceres sobre sua condição e desempenho.

Atualmente, esse processo conta com ferramentas que subsidiam a tomada de decisão, como as simulações numéricas, que permitem extrapolar as informações pontuais dos instrumentos e avaliar o comportamento da estrutura em regiões não diretamente monitoradas. Essas análises, usualmente associadas aos modos de falha de cada estrutura, possibilitam a realização de avaliações que contribuem para a compreensão do seu estado de segurança.

No entanto, essas abordagens, quando aplicadas de forma isolada, apresentam limitações na integração das diferentes fontes de informação e na priorização objetiva dos cenários mais críticos. Nesse contexto, a análise de risco aplicada à segurança de barragens permite integrar informações de natureza geotécnica, estrutural e operacional — abrangendo diferentes componentes, como barragens de terra, concreto e vertedouros — em uma estrutura sistemática. Essa abordagem possibilita a identificação dos modos de falha mais relevantes, bem como a avaliação de suas probabilidades e consequências.

De modo geral, para o desenvolvimento de uma análise de risco robusta, inicialmente são identificados os possíveis modos de falha da estrutura, os quais são posteriormente classificados conforme a disponibilidade de informações — incluindo dados e metodologias — para a realização de análises qualitativas, semiquantitativas ou quantitativas [1].

As análises de estabilidade com abordagem probabilística constituem um dos métodos capazes de tratar as incertezas inerentes ao meio geotécnico, permitindo a consideração da variabilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento a partir de conjuntos de dados, em substituição ao uso exclusivo de valores médios, típicos das análises determinísticas. Nessas últimas, o resultado é expresso por meio do fator de segurança, obtido a partir da relação entre esforços internos resistentes e solicitantes, geralmente calculados por métodos de equilíbrio limite ou elementos finitos. Já a abordagem probabilística, por meio do tratamento estatístico dessas variáveis, permite estimar a probabilidade de ruptura, caracterizando uma análise quantitativa do problema. Dessa forma, as abordagens determinística e probabilística se complementam, associando ao fator de segurança uma medida explícita das incertezas envolvidas.

Este trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia aplicada para a obtenção da probabilidade de falha associada à instabilidade do talude de jusante da Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME) de Itaipu, considerando condições de fluxo permanente.

2. BARRAGEM DE TERRA DA MARGEM ESQUERDA DE ITAIPU

A Barragem de Itaipu apresenta altura máxima de 196 metros e aproximadamente 8 km de extensão, sendo composta por um conjunto de estruturas em concreto, terra e enrocamento. A barragem principal e as estruturas adjacentes, como o vertedouro e a casa de força, são de concreto. As barragens de aterro fazem o fechamento das ombreiras direita e esquerda [2]. A Figura 1 apresenta a disposição em planta das estruturas que compõem a Barragem de Itaipu.

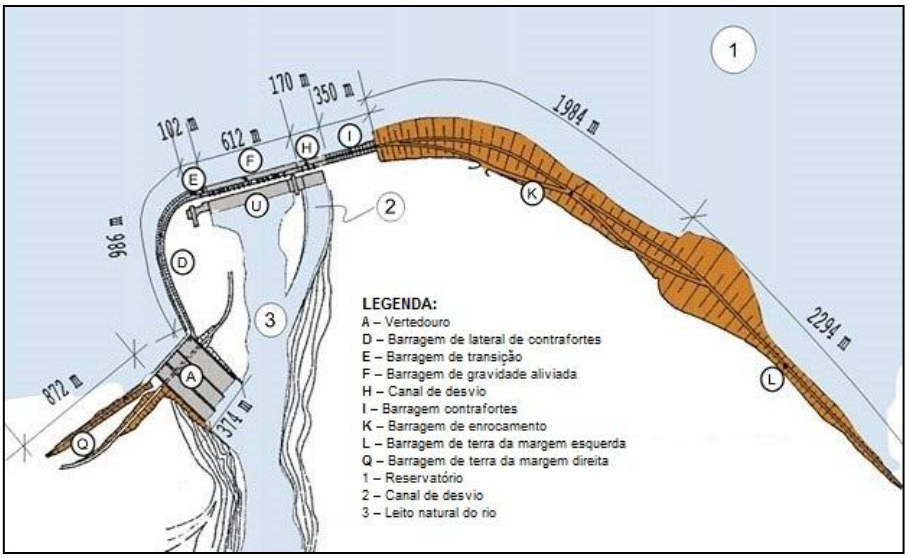


Figura 1 - Disposição das estruturas da barragem da Itaipu Binacional [2].

A Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME), apresentada em primeiro plano na Figura 2, possui aproximadamente 2 km de extensão e altura máxima de 30 m. São identificadas duas seções típicas ao longo do maciço: uma correspondente ao trecho com altura de até 10 m e outra referente ao trecho com altura entre 10 e 30 m. A principal distinção entre essas seções está na presença de bermas de aterro nos trechos de maior altura, conforme descrito por [2].

A seção da Estaca 135+50 apresenta altura de 10,5 m, sendo sua fundação composta por aproximadamente 4,0 m de argila, que se encontra sobreposta à 3,0 m de saprolito em média, abaixo deste material ocorre o maciço rochoso (Figura 3). Essas características fazem desta estaca uma seção representativa da maior parte do trecho da BTME que não apresenta bermas, motivo pelo qual tem sido objeto de diversos estudos técnicos.

Em [3], é apresentada a variação dos fatores de segurança dos taludes de montante e jusante em função do nível do reservatório, desde o pé do talude de montante até o nível máximo *maximorum* (Elevação 223) (Figura 4). Para a seção da Estaca 135+50, o menor fator de segurança do talude de jusante ocorre na condição de nível máximo do reservatório (El. 223), sendo este valor de 1,9. O qual encontra-se acima dos critérios de aceitação para o talude de jusante em condição de Percolação Estável, segundo os Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas, que é de 1,5 [4].



Figura 2 - Imagem panorâmica da barragem de Itaipu com foco na Barragem de Terra da Margem Esquerda (Adaptado de [2]).

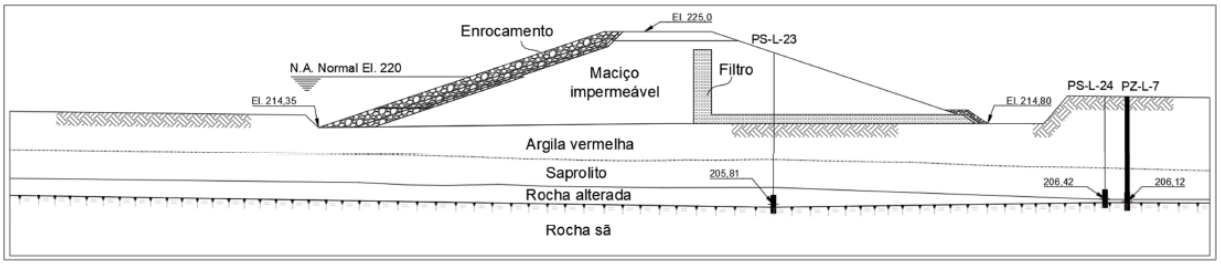


Figura 3 - Seção da Estaca 135+50.

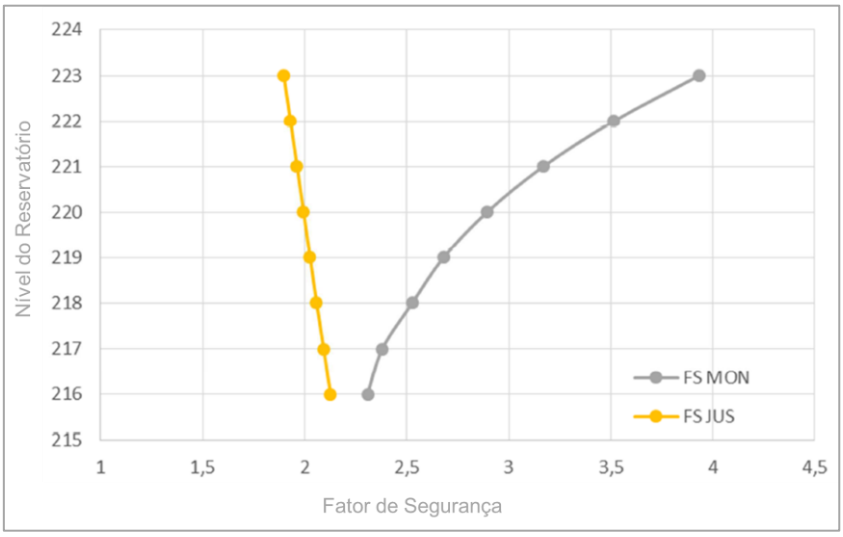


Figura 4 - Variação dos Fatores de Segurança mediante a alteração do NAR para a seção da Estaca 135+50 [3].

3. PARÂMETROS ADOTADOS

A partir das análises determinísticas, verificou-se que as superfícies potenciais de ruptura associadas aos menores fatores de segurança na seção analisada se iniciam na região da crista, atravessam o maciço compactado e se desenvolvem na camada de argila de fundação, acima da camada de saprolito, a qual apresenta maior resistência ao cisalhamento em comparação à argila. A Figura 5 apresenta a superfície de ruptura para menor *FS* na análise determinística.

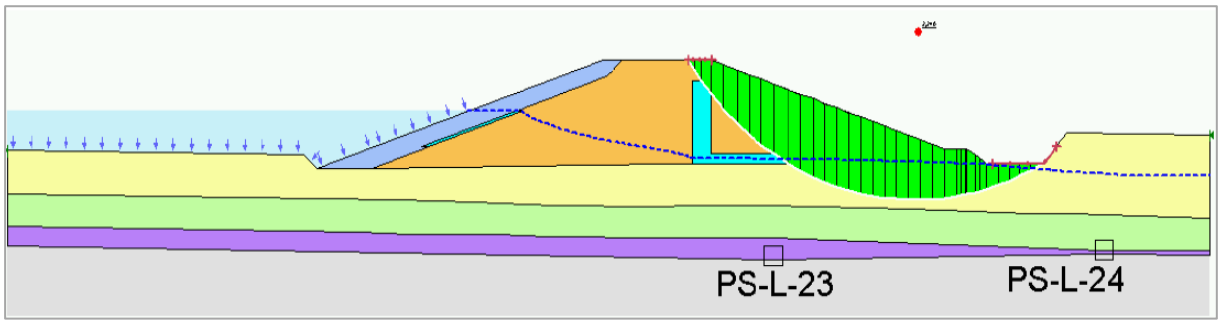


Figura 5 - Superfície de ruptura para menores *FS* em análise determinística.

Assim, optou-se por considerar como variáveis aleatórias os parâmetros de resistência ao cisalhamento (c' e Φ') da argila do maciço compactado e da argila de fundação. Para os demais materiais, foram adotados parâmetros determinísticos, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Síntese dos parâmetros de resistência determinísticos.

Material	Legenda	c' (kPa)	Φ' (º)
Dreno		0	40
Enrocamento		0	40
Saprolito da fundação		20	25
Rocha alterada		20	25

3.1 Argila do Maciço Compactado

Os dados utilizados para a determinação das médias e coeficientes de variação da argila do maciço compactado da BTME foram obtidos a partir de ensaios realizados durante o período construtivo, no âmbito do controle de qualidade da obra.

Durante a construção do maciço, foram coletados, em poços superficiais, 18 blocos indeformados com aproximadamente 30 cm de aresta, os quais foram encaminhados ao Laboratório Central para a realização de ensaios rotineiros e especiais. No que se refere aos ensaios triaxiais, objeto deste estudo, foram executados ensaios que, à época, eram classificados como Q, R, Rsat, S e PN/Q, correspondendo atualmente aos ensaios UU, CU, CUsat, CD e compressão simples, respectivamente.

Considerando que as análises de estabilidade estão voltadas ao talude de jusante em condições normais de operação, situação mais representativa ao longo da vida útil da barragem, a análise dos dados concentrou-se nos ensaios triaxiais consolidados e drenados (CD).

Os ensaios CD foram conduzidos sob controle de deformação, com velocidades da ordem de 0,0007 a 0,0008 mm/min, e com tensões confinantes de 100, 300 e 600

kPa. Ao todo, foram realizados 49 ensaios CD, cujos resultados serviram de base para a caracterização estatística dos parâmetros de resistência do material.

3.2 Argila da Fundação

Com o objetivo de refinar a caracterização dos parâmetros geotécnicos, foram coletadas amostras indeformadas e realizados ensaios triaxiais consolidados e drenados (CD), visando à obtenção de parâmetros representativos para análise estatística aqui proposta, visto que não havia um conjunto de dados suficientes para este tipo de análise.

Considerando a complexidade associada à coleta de amostras em materiais de fundação de uma barragem em operação, foram conduzidas análises preliminares para definição dos locais de amostragem. Em [5] é apresentado o mapeamento do talude do Canal da Piracema, estrutura localizada na região da BTME, cuja escavação expôs as camadas de solo, possibilitando a coleta de amostras indeformadas. A Figura 6 apresenta as trincheiras utilizadas para a coleta das amostras.



Figura 6 - Local da coleta de amostras representativas da fundação [5].

No total, foram coletados três blocos indeformados de argila, como o ilustrado na Figura 7, a partir dos quais foram realizados 33 ensaios triaxiais do tipo consolidado, isotrópico e drenado (CD). Os corpos de prova foram saturados por percolação e contrapressão, sendo a percolação conduzida com gradiente máximo de 10 kPa, de forma a evitar alterações indesejadas na estrutura do solo. Os ensaios foram

executados conforme a norma ASTM D7181, adotando-se tensões de consolidação de 100, 200 e 300 kPa.

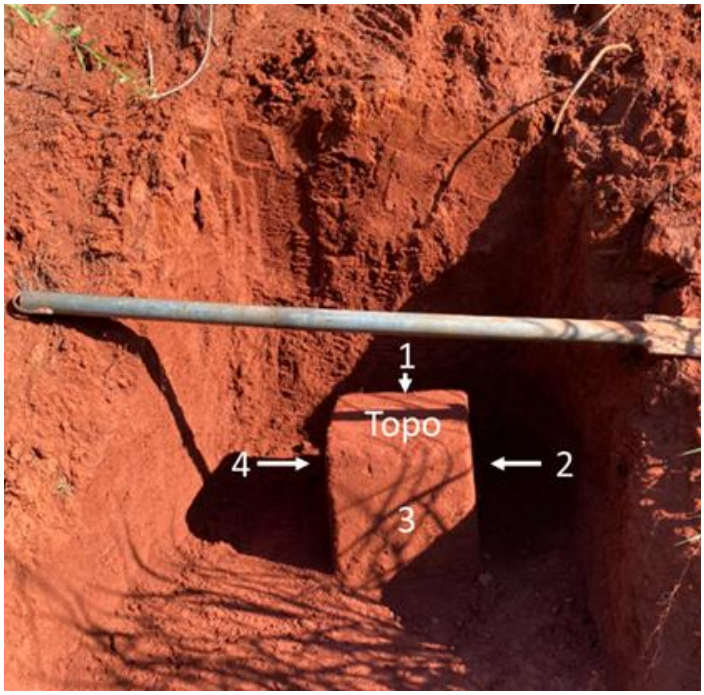


Figura 7 - Bloco de amostra indeformada representativa da argila da fundação da BTME.

3.3 Caracterização Estatística dos Parâmetros

Foi realizada uma revisão bibliográfica de diferentes metodologias para a estimativa das médias e variâncias dos parâmetros de resistência do critério de Mohr-Coulomb, definidos a partir de ensaios de compressão triaxial consolidados e drenados (CD), com o objetivo de caracterizar estatisticamente a coesão efetiva (c') e o ângulo de atrito efetivo (φ') da argila do maciço compactado e da argila de fundação da Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME) de Itaipu. Essa caracterização constitui a base para as análises probabilísticas de estabilidade do talude de jusante na seção da Estaca 135+50.

Dentre os métodos disponíveis, destaca-se o Método de Regressão Linear (LRM), amplamente utilizado para a determinação dos parâmetros médios de resistência ao cisalhamento e recomendado pela NBR 11682:2009 – Estabilidade de Encostas. Entretanto, embora forneça estimativas consistentes dos valores médios de c' e φ', o LRM não permite estimar diretamente suas variâncias.

Com o objetivo de superar essa limitação, foi aplicado neste trabalho o Método de Regressão Linear Modificado (MLRM), proposto por Chen et al. [6]. O método mantém a base conceitual do LRM, porém formula a estimativa simultânea das médias e variâncias de c' e φ' como um problema de otimização não linear no espaço das tensões principais $\sigma_1 \times \sigma_3$, cuja função objetivo é definida pelo modelo de regressão proposto pelos autores. Para tornar o problema bem condicionado e orientar a busca pelo mínimo global, são incorporadas restrições construídas a partir das estimativas obtidas pelo LRM e da regra dos três desvios-padrão (regra dos 3σ), delimitando o domínio de busca do algoritmo de otimização.

Como principal vantagem, o MLRM possibilita a estimativa simultânea das médias e variâncias dos parâmetros de resistência, mesmo a partir de conjuntos de dados relativamente reduzidos, característica particularmente relevante em problemas geotécnicos. Como limitações, o método pressupõe que os parâmetros de resistência possam ser modelados por distribuições normais e requer a aplicação prévia do LRM, cujos resultados, em conjunto com a regra dos 3σ, são utilizados na definição das restrições do problema de otimização.

Em função dessas características, o MLRM foi adotado neste trabalho para a caracterização estatística dos parâmetros de resistência. Os parâmetros c' e φ' foram modelados como variáveis aleatórias independentes com distribuição normal. A Tabela 2 apresenta as médias e os coeficientes de variação estimados para os materiais analisados.

Tabela 2 - Síntese da média e coeficiente de variação dos parâmetros.

Material	Média		Coef. De Variação	
	Coesão Efetiva (c')	Ângulo atrito efetivo (φ')	Coesão Efetiva (c')	Ângulo atrito efetivo (φ')
Argila – Maciço Compac.	46.7	27.6	35%	5%
Argila - Fundação	13.0	23.4	32%	1.5%

Ressalta-se que os parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 2 foram obtidos a partir de ensaios realizados em amostras indeformadas obtidas em regiões representativas de suas respectivas unidades geotécnicas. No caso da argila do maciço compactado, foram utilizados resultados provenientes do programa de controle tecnológico executado durante a construção da barragem, enquanto, para a argila de fundação, a definição dos locais de amostragem baseou-se no mapeamento geológico-geotécnico apresentado em [5]. Assim, para cada material analisado, admitiu-se que os corpos de prova constituíssem uma amostra representativa de uma mesma população estatística, sobre a qual foram estimadas as médias e os coeficientes de variação apresentados na Tabela 2.

Os valores de coeficiente de variação obtidos para os parâmetros de resistência mostram-se coerentes para solos argilosos, nos quais a coesão efetiva (c') tende a apresentar maior variabilidade em comparação ao ângulo de atrito efetivo (φ'). Esse comportamento está associado à maior sensibilidade da coesão às condições de estrutura, grau de saturação e histórico de tensões do solo, enquanto o ângulo de atrito está diretamente relacionado às características granulométricas e ao arranjo das partículas, apresentando, em geral, menor dispersão.

Como referência para os valores obtidos, em [7] é indicado que o coeficiente de variação típico para o ângulo de atrito em argilas saturadas varia entre 2% e 13%, evidenciando que, nos casos analisados, os valores obtidos para φ' situam-se na faixa inferior desse intervalo, caracterizando baixa variabilidade.

4. ANÁLISE DE ESTABILIDADE COM ABORDAGEM PROBABILÍSTICA

A seção analisada foi desenhada a partir de dados de projeto, *as-built*, disposições de campo, relatórios técnicos e informações provenientes de escaneamento superficial. A fundação foi modelada com base em sondagens geotécnicas e nos perfis de instalação de piezômetros e medidores de nível d'água, sendo os instrumentos devidamente posicionados no modelo conforme suas locações reais.

As condições de fluxo, necessárias para a definição das pressões neutras, foram calibradas com base na instrumentação existente, considerando valores médios de um período em que o reservatório apresentou baixa variação de nível, com cota média de El. 219,95, representativa de regime permanente.

Para as análises de estabilidade dos taludes de jusante, sob condições de fluxo permanente, foram adotados os parâmetros de resistência obtidos a partir de ensaios triaxiais consolidados e drenados (CD), por se tratar de uma condição compatível com carregamento drenado (lento).

As análises determinísticas foram realizadas com o auxílio do software SEEP/W e SLOPE/W (Geostudio), utilizando métodos de equilíbrio limite, especificamente o método de Bishop, adequado para superfícies de ruptura circulares. Não foi considerado coeficiente de aceleração sísmica horizontal.

Para as análises probabilísticas, foi empregado o programa computacional *Risk Assessment Applied to Slope Stability* (RASS) [8], desenvolvido com o objetivo de aprimorar o desempenho computacional em análises de confiabilidade geotécnica, que eventualmente se tornam inviáveis em softwares comerciais devido ao elevado custo computacional. O RASS foi concebido como uma ferramenta nativamente probabilística, permitindo o acoplamento direto entre métodos de equilíbrio limite e métodos de confiabilidade. Nesse contexto, os métodos determinísticos fornecem os valores de fator de segurança $FS(\boldsymbol{X})$, enquanto os métodos de confiabilidade permitem estimar o índice de confiabilidade (β) e a probabilidade de falha (*pf*) associada à função de desempenho $g(\boldsymbol{X})$, representativa da condição de ruptura por cisalhamento, correspondente à $pf = P[FS(\boldsymbol{X}) < 1{,}00]$.

A aplicação do RASS ao estudo de caso de Itaipu justifica-se pelo fato de que as probabilidades de falha (*pf*) envolvidas são extremamente baixas, resultando em valores elevados do índice de confiabilidade (β). Nessas condições, métodos convencionais, como Monte Carlo [9], amplamente utilizados na geotecnia, quando aplicados de forma isolada, podem demandar tempos computacionais elevados, que, mesmo com o uso de computadores de alto desempenho, podem atingir ordens de grandeza impraticáveis.

Com a utilização do RASS, foi possível avaliar diferentes métodos de confiabilidade aplicados ao mesmo problema, permitindo a verificação da eficiência computacional e da convergência dos resultados, com vistas à obtenção de estimativas confiáveis.

Por fim, as análises probabilísticas foram conduzidas por meio do *Point Estimate Method* (PEM) [9], o qual possibilitou a estimativa da probabilidade de falha (*pf*) e do índice de confiabilidade (β) para diferentes níveis do reservatório, na seção em estudo, conforme apresentado na Figura 8. As superfícies de ruptura críticas são apresentadas na Figura 9.

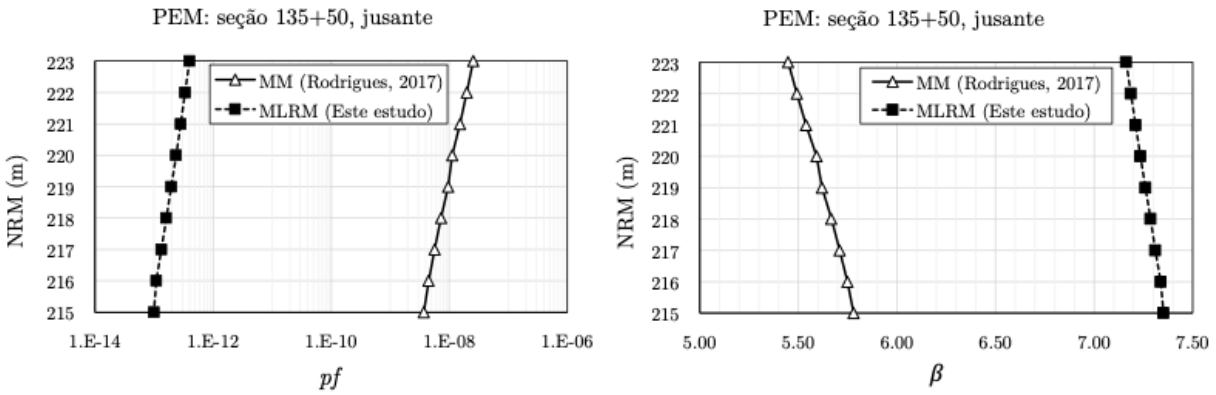


Figura 8 - Probabilidade de falha (*pf*) e *β* associadas ao nível do reservatório à montante (NRM) na seção da Estaca 135+50.

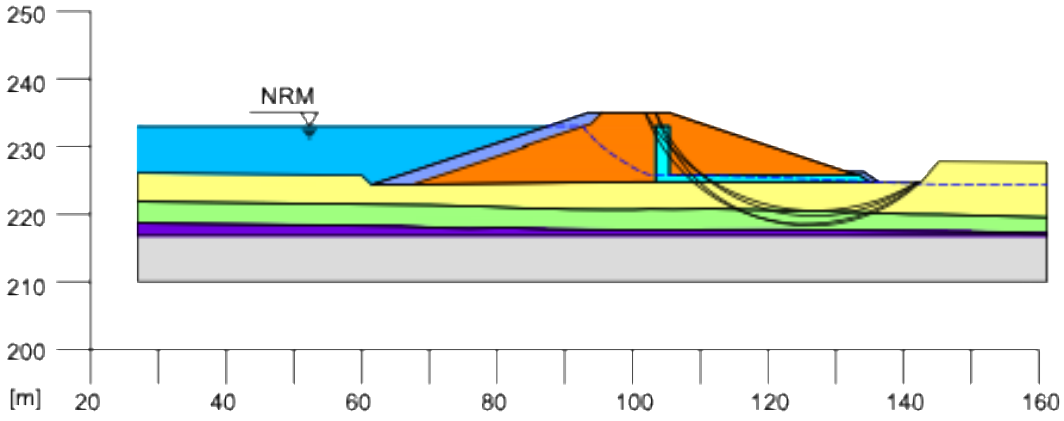
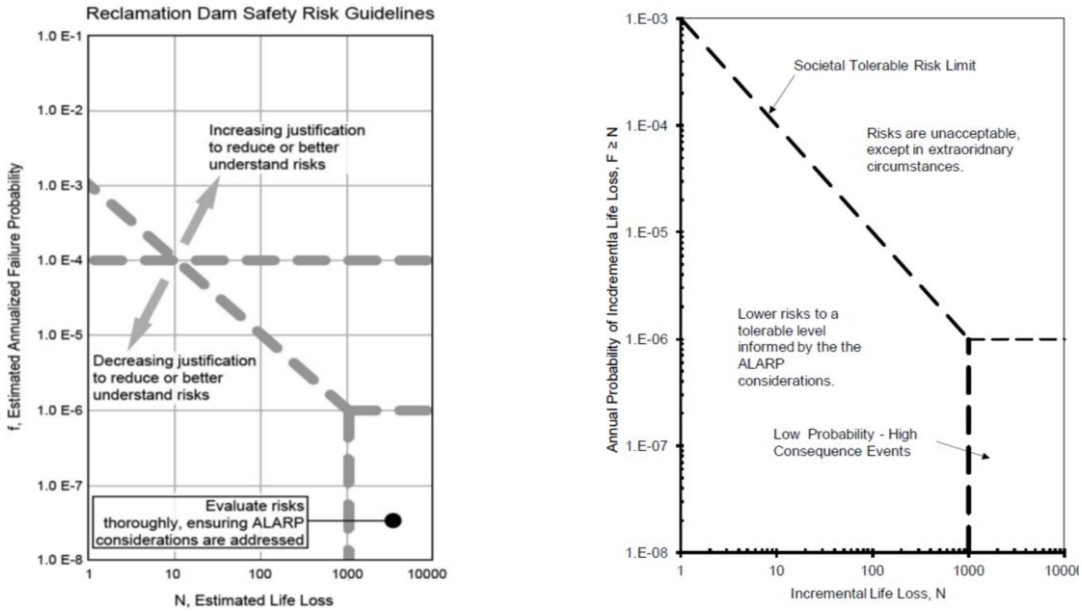


Figura 9 - Superfícies de ruptura obtidas nas análises probabilísticas, segundo método PEM.

A partir das análises apresentadas, observa-se que as superfícies de rupturas apresentam certa semelhança com as obtidas pelas análises determinísticas, iniciando-se na crista e tendo como saída a região do pé do talude a jusante do dreno de pé.

Quanto à probabilidade de falha (*pf*) para a seção da Estaca 135+50 é da ordem de 10^{-12} ou inferior, para todos os níveis do reservatório avaliados. Esse resultado, quando analisado à luz de referências internacionais sobre tolerabilidade de risco em barragens, como os manuais do *Bureau of Reclamation e do U.S. Army Corps of Engineers* [10], indica uma probabilidade de falha extremamente baixa.

De acordo com essas instituições, a avaliação da tolerabilidade do risco passa a ser mais relevante para probabilidades de falha superiores a 10^{-8}, conforme apresentado na Figura 10, sendo que valores inferiores a 10^{-6} já são classificados como de baixa probabilidade, não mantendo, em geral, uma relação direta entre a probabilidade de falha e os danos associados.



a) b)

Figura 10 - Indicadores de Tolerabilidade do Risco; a) Bureau of Reclamation; b) U.S. Army Corps of Engineers.

5. CONCLUSÕES

A partir da análise de estabilidade do talude de jusante da seção da Estaca 135+50, considerada representativa da Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME) de Itaipu, e incorporando a variabilidade dos parâmetros geotécnicos do maciço compactado e da fundação, verificou-se que a probabilidade de falha associada à instabilidade é extremamente baixa.

Esse resultado era, em certa medida, esperado, considerando os elevados fatores de segurança obtidos nas análises determinísticas. No entanto, persistia uma incerteza relevante associada à variabilidade dos parâmetros da fundação, em função da limitação de dados disponíveis previamente ao desenvolvimento deste trabalho. Nesse contexto, a coleta de novas amostras indeformadas e a realização de ensaios adicionais foram fundamentais para a caracterização mais representativa do material, contribuindo para a redução das incertezas associadas à variabilidade dos parâmetros geotécnicos da fundação. A aplicação do MLRM possibilitou a análise estatística desses parâmetros a partir de uma quantidade de amostras inferior àquela usualmente requerida por métodos estatísticos convencionais, impactando positivamente na viabilidade das etapas de coleta, transporte e execução dos ensaios.

A utilização do programa RASS mostrou-se adequada para a realização de análises probabilísticas em cenários com probabilidades de falha muito baixas, permitindo superar limitações computacionais associadas a métodos convencionais.

Os resultados obtidos podem ser verificados de forma direta à luz de diretrizes internacionais, evidenciando que o risco se encontra significativamente abaixo dos limites considerados toleráveis, podendo ser aplicados como subsídio às análises de risco que vêm sendo conduzidas para a estrutura da barragem como um todo.

6. PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade de taludes, análise probabilística, barragem de terra, Itaipu.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CENTRAL WATER COMMISSION (2019) – “Guidelines for Assessing and Managing Risks Associated with Dams”, publicação técnica, New Delhi, Índia.

[2] ITAIPU BINACIONAL (2009) – “Usina Hidrelétrica de Itaipu: Aspectos de Engenharia”, publicação institucional, Foz do Iguaçu, Brasil.

[3] PATIAS, J.; RODRIGUES, R. L. (2020) – “Análise da Influência do Nível de Água do Reservatório nos Fatores de Segurança da Barragem de Terra (ME) de Itaipu”, Anais do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas, Brasil.

[4] ELETROBRÁS (2003) – “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas”, publicação técnica, Rio de Janeiro, Brasil.

[5] PATIAS, J.; FERNANDES, D. O.; RODRIGUES, R. L. (2024) – “Mapeamento do perfil de solos residuais presentes no Canal da Piracema de Itaipu Binacional”, Anais do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Balneário Camboriú, Brasil.

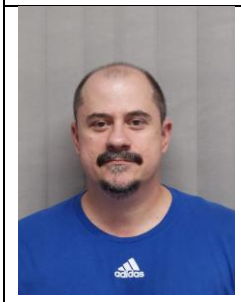
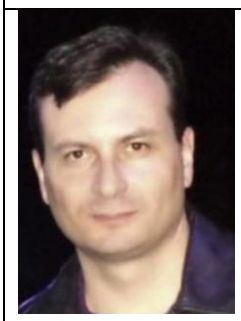
[6] CHEN, L.-H.; LI, X.; XU, Y.; CHEN, Z.-Y.; DENG, G. (2019) – “Accurate Estimation of Soil Shear Strength Parameters”, Journal of Central South University, v. 26, China.

[7] SAYÃO, A. S. F. J.; SANDRONI, S. S.; FONTOURA, S. A. B.; RIBEIRO, R. C. H. (2012) – “Considerations on the Probability of Failure of Mine Slopes”, revista *Soils & Rocks*, v. 35, Brasil.

[8] ASSIS, H. B.; NOGUEIRA, C. G. (2023) – “Comparative Study of Deterministic and Probabilistic Critical Slip Surfaces Applied to Slope Stability Using Limit Equilibrium Methods and the First-Order Reliability Method”, Soils and Rocks, v. 46, n. 2, São Paulo, Brasil.

[9] BAECHER, G. B.; CHRISTIAN, J. T. (2005) – “Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering”, John Wiley & Sons, Estados Unidos.

[10] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2019) – “Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis”, publicação técnica, Estados Unidos.

	**Higor Biondo de ASSIS** Engenheiro Civil (2019), mestre (2019) e doutorando em Engenharia Civil e Ambiental no curso de Geotecnia pela FEB-UNESP – Bauru (atual), com doutorado sanduíche em Geotecnia pela University of Twente – Países Baixos (2023-2024). Atua com estabilidade de taludes, barragens de terra e análises probabilísticas aplicadas à geotecnia, com foco em avaliação de risco e confiabilidade de estruturas.
	**Caio Gorla NOGUEIRA** Possui graduação em Engenharia Civil pela UNESP (2002), mestrado (2005) e doutorado (2010) em Engenharia de Estruturas pela USP. Realizou pós-doutorado na mesma área pela USP (2010–2012). Atualmente é Professor Assistente Doutor no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UNESP, campus de Bauru.
	**Roger Augusto RODRIGUES** Engenheiro Civil pela UNESP - Ilha Solteira, mestrado em Engenharia Civil e Ambiental pela UNESP – Ilha Solteira, doutorado e pós-doutorado em Geotecnia pela USP - São Carlos e doutorado sanduíche em Geotecnia pela Universitat Politècnica de Catalunya – Espanha. Professor Associado da Faculdade de Engenharia da UNESP - Bauru.
	**Rodrigo de Lima RODRIGUES** Engenheiro Civil formado pelo Centro Universitário Dinâmica das Cataratas (2014), mestre em Engenharia Civil (Geotecnia) pela PUC-Rio (2017) e especialista em Segurança de Barragens pela UFBA (2019). Possui experiência em análises geotécnicas, instrumentação e sistema de monitoramento.
	**Josiele PATIAS** Engenheira civil, com mestrado e doutorado em Geotecnia pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). É engenheira sênior na Itaipu Binacional, atuando nos temas de segurança de barragens e geotecnia. Além disso, desempenha atividade de pesquisa e desenvolvimento no tema segurança de barragens por meio de convênio entre Itaipu Binacional e Itaipu Parquetec.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.1
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

Análise do Comportamento de Rejeitos Empilhados de Forma Operacional por Meio de Ensaios CPTu

Igor BRENO SILVA FARIA
Mestre em Engenharia Civil - CEFET-MG

Jean CARLOS MACSON CARDOSO
Mestre em Geotecnia - UFOP

Lincoln AZEVEDO BARONY
Mestrando em Engenharia Civil - UFOP

RESUMO

O setor de disposição de rejeitos na mineração apresenta um grande desafio para a gestão atual desses materiais. Cada tipo de disposição, seja ela em pilhas ou barragens, evidencia aspectos restritivos e singulares para cada alternativa. Entretanto, atualmente o empilhamento de rejeitos filtrados têm se tornado fundamental para o futuro da mineração. O empilhamento desses materiais se mostra uma boa alternativa na gestão do manejo, uma vez que não há a caracterização de armazenamento de uma alta energia potencial, como por exemplo, uma barragem. Por outro lado, a disposição em pilhas exige o envolvimento de um grande número de equipamentos para a realização das atividades. Dessa forma, o presente estudo objetivou analisar o comportamento de um rejeito empilhado de forma operacional com a utilização de equipamentos convencionais disponíveis na mina. A partir de premissas operacionais previamente definidas, realizou-se a disposição do material e, ao final, uma campanha de investigação por meio de ensaios CPTu para avaliação do comportamento geotécnico do depósito. Verificou-se que o rejeito apresentou um comportamento dilatante, indicando que as condições operacionais adotadas foram consistentes com o comportamento esperado para o material.

ABSTRACT

The tailings disposal sector in mining represents a major challenge for the current management of these materials. Each disposal method, whether in stockpiles or dams, presents specific constraints and unique characteristics. However, the stacking of filtered tailings has become increasingly important for the future of mining. Stacking these materials is considered a suitable tailings management alternative, as it does not involve the storage of large volumes of material under high potential energy, as is the case with tailings dams. On the other hand, tailings stacking requires the use of a significant number of equipment and operational resources.2 3Therefore, the present study aimed to analyze the behavior of tailings

stacked under operational conditions using conventional equipment available at the mine. Based on previously defined operational premises, the material was stacked and, upon completion, a geotechnical investigation campaign was carried out using CPTu tests to evaluate the geotechnical behavior of the deposit. The results indicated that the tailings exhibited dilative behavior, suggesting that the adopted operational conditions were consistent with the expected geotechnical performance of the material.

1. INTRODUÇÃO

Uma temática extremamente relevante no setor da mineração é a gestão dos rejeitos. Esses materiais devem ser tratados de forma adequada para mitigar os riscos, garantir a segurança de pessoas e meio ambiente, bem como possuir um manejo economicamente viável. A gestão de rejeitos vai muito além de segurança e economia. Ela reflete a governança da empresa para com a comunidade e seus colaboradores.

Por muito tempo a disposição de rejeitos deu-se preferencialmente de maneira hidráulica em barragens e no passar dos anos e com os avanços tecnológicos, observa-se uma tendência para empilhamento desses materiais. O empilhamento de rejeitos resulta na implementação de uma pilha, estrutura geotécnica que possui interferências diretas na operação.

Os depósitos formados por empilhamento de material geralmente apresentam danos menores, caso ocorra algum tipo de ruptura, quando comparado às estruturas caracterizadas por barramentos.

Por outro lado, as pilhas demandam uma grande quantidade de equipamentos para sua implementação/operação. A implementação das pilhas também exige um rigor no controle tecnológico para garantir que os materiais apresentem adequado comportamento frente aos carregamentos, visto que as pilhas podem atingir centenas de metros de altura e consequentemente elevados níveis de tensão.

Possuir um controle tecnológico calibrado para o material a ser trabalhado é um dos primeiros passos para o empilhamento de rejeitos. E para ter a garantia que o controle tecnológico está sendo realizado da maneira correta, deve-se realizar investigações geotécnicas na estrutura para a análise do comportamento do rejeito.

Essas investigações podem ser realizadas a partir de ensaios de laboratório ou ensaios de campo. Um ensaio robusto, versátil e já conhecido no ramo da geotecnia é o Ensaio de Piezocone ou CPTu (Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement). A partir dos resultados desse ensaio é possível determinar a estratigrafia do solo e as propriedades dos materiais. Para os valores obtidos em campo, existem diversas correlações, muito bem estabelecidas, as quais pode-se estimar diversos parâmetros do solo [1].

O ensaio de piezocone consiste na cravação de uma haste cilíndrica com a ponta cônica no solo a uma velocidade constante (geralmente 2 cm/s), onde sensores presentes na extremidade da haste, captam valores referentes a resistência de ponta, atrito lateral e valores de poropressão. No Brasil, comumente, utiliza-se a norma

americana ASTM D5778-12/20: Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils [1] [2].

Dessa forma, o presente estudo possui como objetivo avaliar o comportamento geotécnico de um rejeito empilhado sob condições operacionais de mina, utilizando critérios mínimos de controle durante a disposição do material, e verificar por meio de ensaios CPTu se o depósito apresenta comportamento predominantemente dilatante.

2. METODOLOGIA

2.1 Premissas Operacionais do Empilhamento

O empilhamento do rejeito foi realizado em condições operacionais de mina, utilizando equipamentos convencionalmente empregados na disposição do material. As premissas adotadas foram estabelecidas com base na avaliação de disposições anteriores executadas sem controle operacional específico, nas quais observavam-se camadas com espessuras superiores a 1,0 m e, em alguns casos, próximas de 1,5 m.

Considerando que espessuras elevadas de camada tendem a dificultar a transmissão dos esforços de compactação ao longo de toda a massa depositada, adotou-se como premissa operacional a disposição do rejeito em camadas com espessura aproximada de 50 cm, associada à realização de, no mínimo, cinco passadas de trator D6 sobre cada camada. O material utilizado era proveniente da pilha pulmão e apresentava condição predominantemente “seca” no momento do lançamento.

A hipótese adotada no estudo foi que a introdução desses controles operacionais mínimos possibilitaria maior densificação do material quando comparada às práticas anteriormente empregadas, nas quais não havia critérios mínimos definidos para a execução do empilhamento, favorecendo a manutenção de um comportamento predominantemente dilatante do rejeito após a disposição.

Com o objetivo de verificar o comportamento geotécnico resultante dessas condições de execução, foi realizada posteriormente uma campanha de investigação por meio de ensaios CPTu. Nesse contexto, os ensaios foram utilizados como ferramenta de avaliação do comportamento do depósito executado e de verificação da adequação das premissas operacionais adotadas.

2.2 Características do Material

O rejeito avaliado é proveniente de atividades minerárias de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Trata-se de um material majoritariamente com granulometria de uma areia fina, conforme a curva granulométrica apresentada na Figura 1.

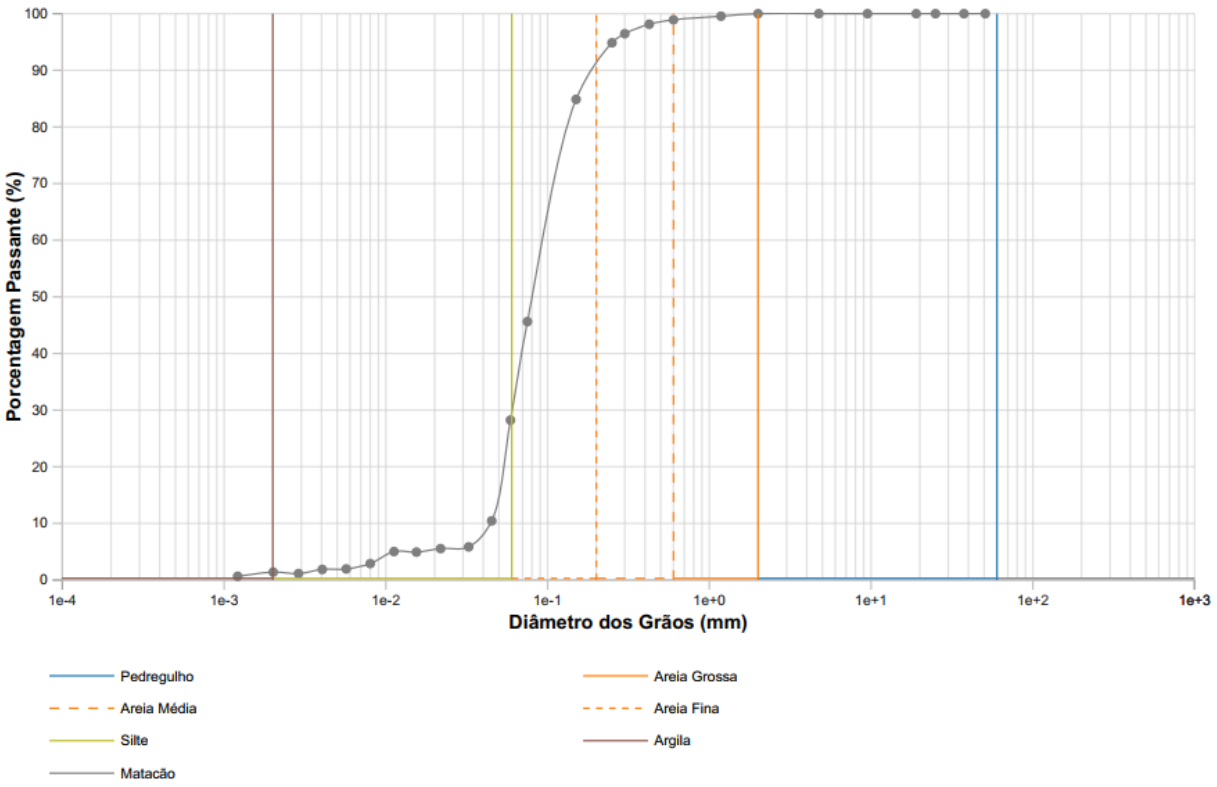


Figura 1 – Granulometria do material

Por meio de ensaios de caracterização básica de laboratório foi possível determinar a massa específica dos grãos, Limites de Atterberg e teor de umidade, e os dados dos ensaios são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados dos ensaios de caracterização do material.

Ensaio	Resultado
Massa específica dos grãos média (g/cm³)	3,122
Teor de umidade (%)	5,99
Limite de Plasticidade (%)	Não plástico
Limite de liquidez (%)	Não líquido

Além disso, foram realizados ensaios de compactação Proctor Normal para obtenção dos parâmetros relacionados à compactação. A curva de compactação é apresentada na Figura 2. A massa específica seca máxima obtida foi de 1,807 g/cm³ e umidade ótima de 16,52%.

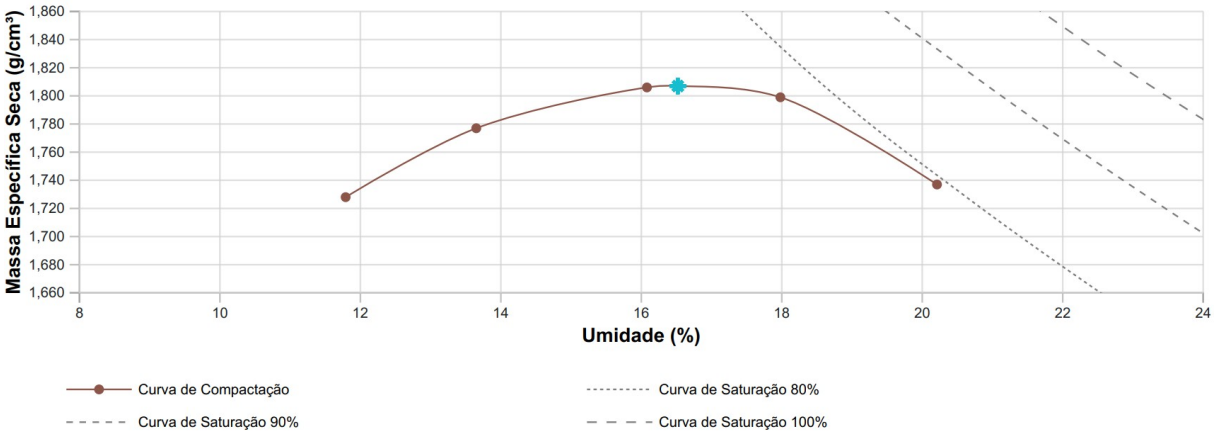


Figura 2 – Curva de compactação do material

2.3 Ensaio de Piezocone

Foram realizados 7 furos CPTu distribuídos na praça de disposição de material, totalizando 100,56 metros de investigação realizada. Os furos alcançaram diferentes profundidades devido as características dos materiais, inclinação admissível da haste, resistência encontrada e ancoragem da sonda.

A Tabela 2 apresenta os furos com as respectivas profundidades e a Figura 3 apresenta a foto de um dos furos sendo executado.

Tabela 2 – Furos CPTu

Investigação	Profundidade (m)
Furo 01	14,42
Furo 02	20,00
Furo 03	16,00
Furo 04	18,46
Furo 05	12,90
Furo 06	3,78
Furo 07	15,00



Figura 3 – Ensaio de Piezocone em andamento.

3. RESULTADOS

A partir dos 7 furos executados foi possível obter os parâmetros diretos dos ensaios: resistência de ponta (qt), atrito lateral (Rf) e poropressão (u). A Figura 4 apresenta os dados registrados pelo equipamento para cada furo realizado.

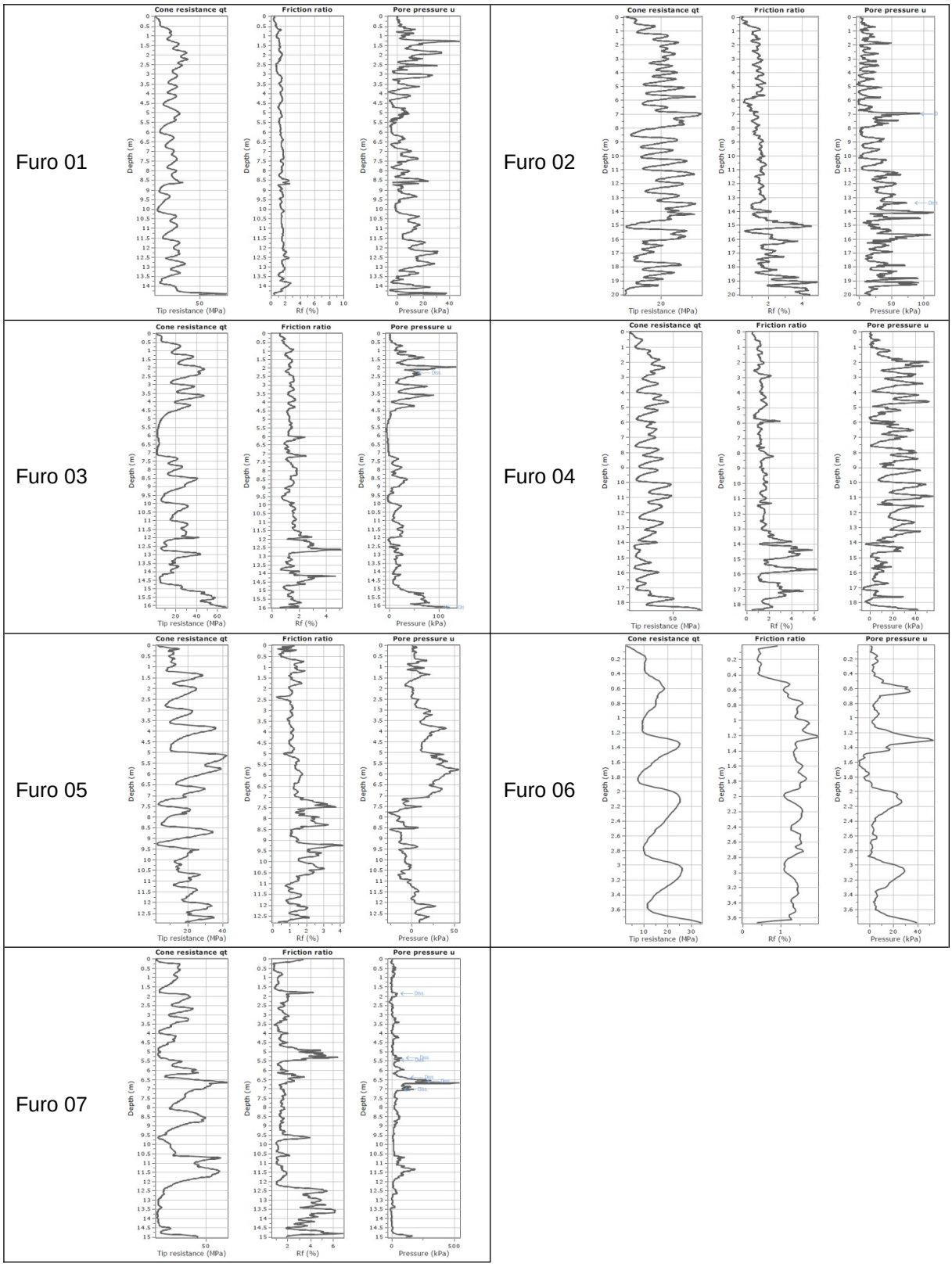


Figura 4 – Resultados dos ensaios.

Com intuito de avaliar o rejeito frente ao comportamento dilatante ou contrátil utilizou-se a metodologia de Robertson (2016), bem como a avaliação do CD, Bq e o parâmetro de estado (ψ), conforme apresentado por Jefferies e Been (2016). Os dados de todos os furos estão apresentados nas Figuras 5 e 6.

Robertson (2016) propõe a avaliação baseada no parâmetro CD e no ábaco SBTn, em que a contratibilidade dos materiais é determinada a partir dos limites estabelecidos pelo autor, onde os materiais com um valor de CD abaixo de 70 são classificados como contráteis [3].

Além dessa avaliação, é usual realizar a avaliação por meio do parâmetro de estado. O parâmetro de estado (ψ) é definido pela diferença entre o índice de vazios do estado atual do solo (e) e o índice de vazios no estado crítico (ec) no mesmo nível de tensões. De acordo com Jefferies e Been (2016), o parâmetro de estado é utilizado para verificação da posição em relação à Linha de Estado Crítico que um solo se encontra. Solos mais densos apresentam comportamento dilatante, com maior resistência ao cisalhamento em condições não drenadas, enquanto solos mais fofos apresentam comportamento contrátil, com menor resistência ao cisalhamento em condições não drenadas. Jefferies e Been (2016) e Shuttle e Cunning (2007) sugerem que quando um solo tem o parâmetro de estado superior a -0,05, a perda de resistência e o acréscimo de deformações são esperados [3].

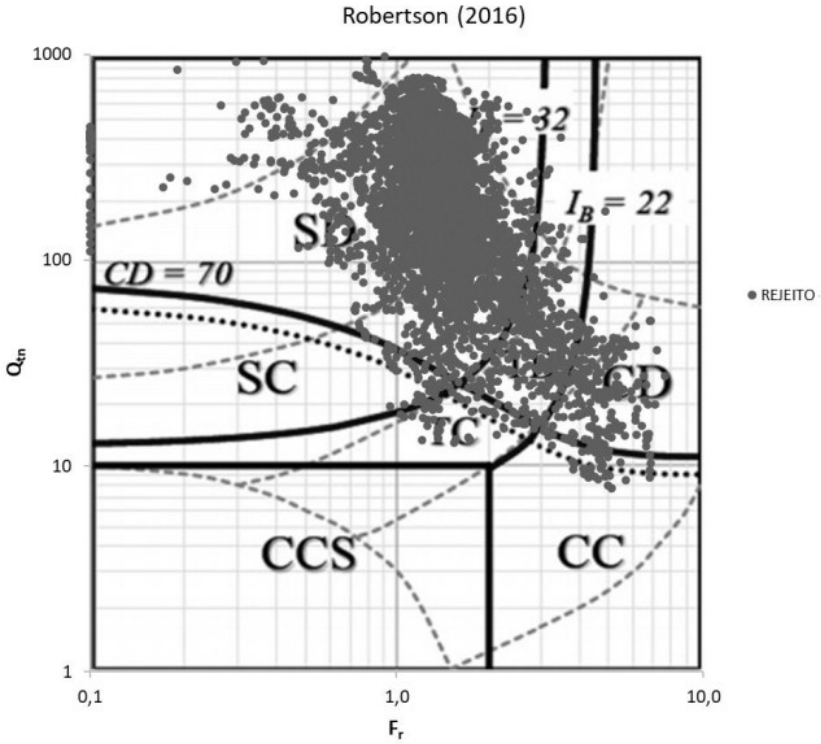


Figura 5 – Avaliação parâmetro CD Robertson (2016).

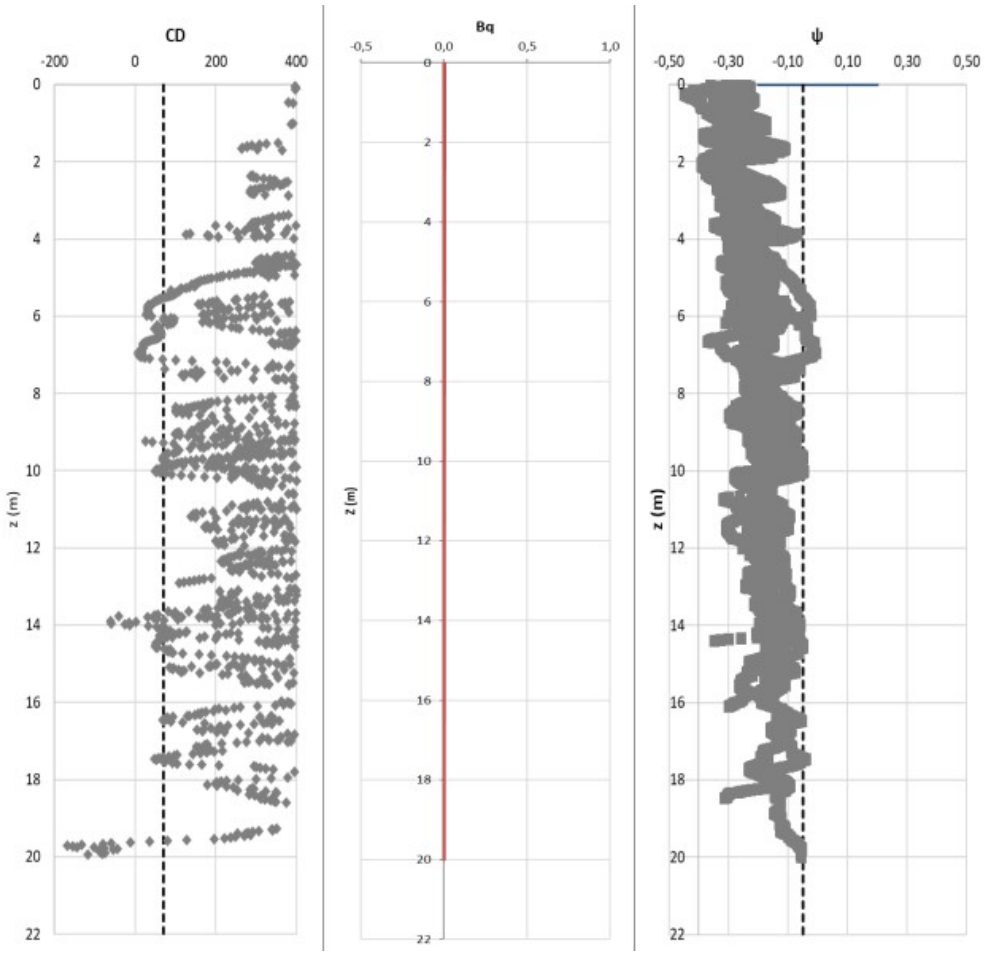


Figura 6 – CD, Bq e ψ

Verifica-se que pelo método de Robertson, de forma majoritária os furos apresentaram comportamento dilatante. Bem como para o valor de CD, a maioria dos furos possui valor maior que 70, o que acrescenta à característica do material como comportamento dilatante.

Além disso, de maneira complementar à análise, os valores de Bq mostram-se muito próximos a 0 (zero) e os valores de parâmetro de estado do material em sua maioria, exibiram valores menores que -0,05, o que corrobora com um comportamento dilatante do rejeito.

4. CONCLUSÕES

A campanha de investigação do rejeito foi composta por 7 furos CPTu os quais permitiram identificar e obter os parâmetros dos materiais. A partir dos resultados obtidos, constata-se que o rejeito empilhado possui um comportamento dilatante, não apresentando excessos de poropressões que pudessem indicar susceptibilidade à liquefação.

Os resultados dos ensaios CPTu indicaram comportamento predominantemente dilatante do rejeito investigado. Para as condições avaliadas, caracterizadas pela disposição em camadas de aproximadamente 50 cm e compactação mínima por cinco

passadas de trator D6, os resultados mostraram-se consistentes com as premissas operacionais adotadas para o empilhamento. Ressalta-se que os resultados são representativos das condições e níveis de tensão avaliados na estrutura avaliada.

5. PALAVRAS-CHAVE

Rejeito; Empilhamento; CPTu.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Schnaid, F., & Odebrecht, E. (2012) - *Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia* (2nd ed.), Oficina de textos, São Paulo.

[2] Massad, F. (2010). *Obras de terra* (2nd ed.), Oficina de textos, São Paulo.

[3] Jefferies, M., Been, K. (2016) – *Soil liquefaction – A Critical State Approach* (2nd ed.), 690. Boca Raton, FL.

 FOTO 3x4	**Igor BRENO SILVA FARIA** Engenheiro Civil e mestre em Engenharia Civil pelo CEFET-MG, com tema de pesquisa de análises dinâmicas de estruturas geotécnicas. Atuou com obras de fundações e contenções e atualmente aplica-se na geotecnia operacional de mineração com inspeção, monitoramento e gestão de segurança de barragens e pilhas de estéril e rejeito.
 FOTO 3x4	**Jean CARLOS MACSON CARDOSO** Engenheiro Civil Mestre em Geotecnia pela UFOP-MG com atuação em gestão de barragens e empilhamento de rejeitos, gestão de risco, segurança, descaracterização, projetos de estabilização, operação e conformidade com regulamentações estaduais, nacionais e ao GISTM.
 FOTO 3x4	**Lincoln AZEVEDO BARONY** Engenheiro Civil mestrando em engenharia civil pela UFOP-MG, abrangendo projetos de estabilidade estrutural de ativos geotécnicos, incluindo obras de contenções e infraestrutura associada. Atualmente insere-se no geotecnia operacional de mineração com foco em inspeção, monitoramento e segurança das operacional.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.1
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO SOB CARREGAMENTOS DE TRÁFEGO NA CRISTA

Eduarda Lima de SOUZA
Engenheira Civil - UFPA

Aldenora Vieira SANTOS NETA
Engenheira Civil - UFPA

Davi Carvalho MOREIRA
Professor Adjunto - UFPA

Caio Carvalho MOREIRA
Professor Adjunto - UFPA

RESUMO

Este estudo investiga o impacto do tráfego de veículos pesados na crista de barragens de enrocamento com núcleo argiloso por meio de modelagem numérica (SEEP/W e SIGMA/W). Utilizando o modelo de Mohr-Coulomb, avaliou-se a resposta mecânica sob pressões de 10, 20 e 50 kPa. Os resultados mostram que os deslocamentos globais são governados por ações permanentes, com baixa sensibilidade ao tráfego. Entretanto, o topo do núcleo é a região crítica, onde o efeito de arco e a interação núcleo–filtro reduzem o confinamento efetivo e concentram tensões. Sob a ótica do *shakedown*, os carregamentos de 10 e 20 kPa mantiveram menor mobilização resistente, enquanto 50 kPa aproximou essa região de estados tensionais associados à fluência plástica. Conclui-se que o controle do tráfego pesado na crista é essencial para preservar a segurança estrutural da barragem.

ABSTRACT

This study investigates the impact of heavy vehicle traffic on the crest of earth-core rockfill dams through numerical modeling using SEEP/W and SIGMA/W. The mechanical response was evaluated using the Mohr–Coulomb constitutive model under equivalent surface pressures of 10, 20, and 50 kPa. The results indicate that global displacements are primarily governed by permanent actions, showing low sensitivity to traffic loading. However, the upper portion of the core is identified as the critical region, where the arching effect and the core–filter interaction reduce the effective confinement and concentrate stresses. From the perspective of shakedown theory, the 10 and 20 kPa load cases resulted in lower mobilization of shear resistance, whereas the 50 kPa load brought this region closer to stress states associated with plastic creep. It is concluded that controlling heavy vehicle traffic on the dam crest is essential to preserve the structural safety of the dam.

1. INTRODUÇÃO

A ampla utilização de barragens de terra e enrocamento em projetos de grande porte deve-se à sua versatilidade geológica, ao aproveitamento de materiais locais e à sua eficiência estrutural [1,2,3]. O comportamento mecânico dessas estruturas é fortemente governado pela resposta tensão–deformação dos materiais constituintes, com destaque para o núcleo argiloso, cuja integridade é fundamental para o controle de percolação e para a segurança global da barragem [1,4,5,6]. Nesse contexto, a análise numérica baseada no método dos elementos finitos (MEF) tem se consolidado como uma ferramenta essencial para a investigação do comportamento de barragens ao longo das fases de construção, enchimento do reservatório e operação [7,8,9].

De modo geral, as análises de projeto e as avaliações de segurança concentram-se nas ações tradicionais, como o peso próprio, as cargas hidráulicas e os efeitos sísmicos. Entretanto, em diversos empreendimentos hidrelétricos, a crista da barragem é utilizada como infraestrutura viária para atividades operacionais, de manutenção, especialmente em regiões remotas, sendo submetida à circulação regular de veículos pesados [10]. Esse uso operacional introduz ações adicionais de superfície que são frequentemente simplificadas ou negligenciadas nas análises estruturais convencionais, apesar de seu potencial impacto sobre o estado de tensões e deformações no corpo da barragem e em seus elementos de vedação, como núcleos argilosos e paredes diafragma [5,6]. Estudos recentes indicam que a consideração explícita dessas ações é necessária para uma avaliação mecânica mais realista da segurança estrutural de barragens de terra e enrocamento [2,10].

Essa lacuna assume particular relevância no contexto brasileiro, marcado por grandes empreendimentos hidrelétricos. A barragem da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHE Tucuruí) destaca-se como um empreendimento de escala excepcional e elevada complexidade técnica na região amazônica, frequentemente caracterizado como um megaprojeto em função de suas dimensões, localização remota e desafios operacionais associados [11], sendo tipificada como uma barragem de terra e enrocamento [1]. Nesses empreendimentos, a crista da barragem desempenha um papel estratégico como infraestrutura logística, o que reforça a necessidade de avaliações mecânicas específicas que considerem o tráfego veicular como uma ação operacional relevante, em consonância com diretrizes internacionais de segurança de barragens estabelecidas pela *International Commission on Large Dams* (ICOLD) [12].

Ressalta-se que a geometria adotada neste estudo é inspirada nas dimensões gerais da barragem da UHE Tucuruí, utilizada apenas como referência geométrica representativa de uma barragem de terra e enrocamento de grande porte. Os parâmetros geotécnicos empregados na modelagem foram selecionados a partir de valores reportados na literatura especializada, adotando-se um conjunto representativo de propriedades para cada material. Dessa forma, o estudo possui caráter conceitual e, por meio de uma modelagem numérica bidimensional em elementos finitos, busca investigar os mecanismos mecânicos associados ao tráfego veicular sobre a crista, sem reproduzir as condições específicas de uma barragem existente.

2. MODELO NUMÉRICO E METODOLOGIA

2.1. Geometria e configuração geral

A análise numérica utiliza a geometria de uma seção transversal de barragem de terra e enrocamento com núcleo argiloso central, seguindo a tipologia de [1]. O modelo baseia-se na Barragem de Terra do Canal do Rio (BTCR) da UHE Tucuruí, utilizando suas dimensões gerais e arranjo construtivo como referência para o zoneamento adotado no estudo [11,13].

A seção modelada (Figura 1) representa, de forma conceitual, uma barragem de terra e enrocamento inspirada na configuração da BTCR, sendo composta pelos principais elementos estruturais: núcleo argiloso impermeável, enrocamento fino, enrocamento grosso, filtro vertical, tapete drenante, dreno de pé e diferentes camadas de fundação. A crista foi modelada como plataforma para o tráfego de veículos pesados, reproduzindo a condição operacional observada em barragens que também desempenham função de infraestrutura viária em regiões remotas [10].

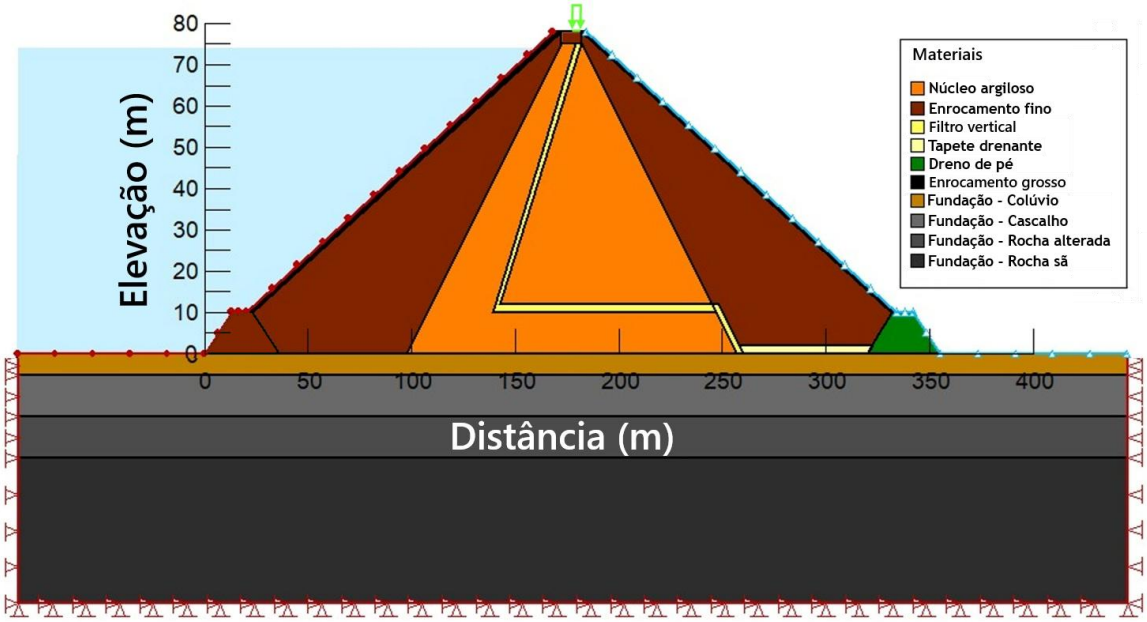


Figura 1 – Modelo conceitual de uma barragem de terra e enrocamento adotado na modelagem numérica bidimensional, mostrando o zoneamento dos materiais, as condições de contorno e o carregamento veicular aplicado na crista.

A modelagem utilizou um acoplamento hidromecânico no ambiente GeoStudio, no qual os resultados da análise de percolação (SEEP/W) definem o campo de poropressões para a análise de tensão–deformação (SIGMA/W). Esse procedimento, amplamente empregado na previsão de recalques e na avaliação da segurança de barragens [3], utiliza uma malha bidimensional de elementos finitos com refinamento localizado no núcleo argiloso e no topo do núcleo, visando capturar com maior precisão os efeitos das cargas veiculares [6,7].

As simulações no módulo SIGMA/W foram conduzidas em dois estágios: (i) Carregamento, correspondente à aplicação sequencial do peso próprio, das poropressões obtidas no SEEP/W e da carga veicular equivalente, permitindo obter os deslocamentos e o estado de tensões correspondente ao carregamento aplicado;

e (ii) Redistribuição de Tensões, executado sem a introdução de novos carregamentos externos, com o objetivo de avaliar a reorganização interna do campo de tensões após o equilíbrio mecânico.

Embora os deslocamentos globais tenham sido utilizados para avaliar a resposta estrutural da barragem, a interpretação dos mecanismos locais concentrou-se nas tensões efetivas, por constituírem as grandezas que governam a resistência ao cisalhamento e a mobilização plástica dos solos segundo o modelo constitutivo de Mohr–Coulomb. Essa abordagem é particularmente adequada para barragens de terra, uma vez que a estabilidade e o desenvolvimento de deformações permanentes são governados predominantemente pelo estado de tensões efetivas, e não apenas pelas tensões totais.

O estudo possui caráter conceitual e representativo de barragens zonadas de tipologia semelhante, focando nos mecanismos de deformação sob tráfego, sem a pretensão de reproduzir o estado exato (*as-built*) da BTCR.

2.2. Propriedades dos materiais e modelos constitutivos

A resposta mecânica dos materiais foi simulada por meio do modelo elastoplástico de Mohr–Coulomb. Embora simplificado em relação a modelos constitutivos mais avançados, esse modelo apresenta ampla aplicação em análises de barragens de terra e enrocamento, oferecendo boa capacidade para representar o comportamento global da estrutura sob carregamentos estáticos, além de utilizar parâmetros geotécnicos de obtenção relativamente simples [1,3,8]. As propriedades geotécnicas empregadas na modelagem são apresentadas na Tabela 1, juntamente com as respectivas faixas de valores reportadas na literatura.

Tabela 1 – Propriedades geotécnicas dos materiais adotados no modelo numérico.

Material	γ **(kN/m³)**	E **(MPa)**	ν **(–)**	c **(kPa)**	φ **(°)**	k **(m/s)**	**Referências**
Núcleo argiloso	**18**–20	20–**40**	0,30–**0,35**	20–**35**	18–**23**	**10^{-9}**–10^{-8}	[1,2]
Enrocamento fino	**19**–21	50–**80**	0,25–**0,30**	**0**	30–**34**	**10^{-6}**–10^{-5}	[1]
Filtro vertical	**20**–22	80–**120**	0,25–**0,30**	**0**	32–**36**	10^{-5}–**10^{-4}**	[1]
Tapete drenante	**20**–23	55–**150**	0,20–**0,30**	**0**	35–**38**	10^{-4}–**10^{-2}**	[3,8]
Dreno de pé	**20**–23	55–**150**	0,20–**0,30**	**0**	35–**38**	10^{-4}–**10^{-2}**	[3,8]
Enrocamento grosso	**21**–23	150–**300**	0,20–**0,25**	**0**	38–**42**	10^{-3}–**10^{-2}**	[1,3]
Fundação – Colúvio	**18**–20	10–**50**	0,30–**0,35**	10–**50**	25–**31**	10^{-8}–**10^{-6}**	[1,13]
Fundação – Cascalho	**21**–23	100–**500**	0,25–**0,30**	**0**	34–**38**	10^{-5}–**10^{-3}**	[1,13]
Fundação – Rocha alterada	**22**–24	1.000–**5.000**	0,20–**0,25**	0–**200**	35–**42**	**10^{-7}**–10^{-5}	[2,5]
Fundação – Rocha sã	**23**–26	10.000–**30.000**	0,20–**0,25**	0–**500**	40–**50**	**10^{-9}**–10^{-7}	[2]

Nota: As faixas apresentadas correspondem a valores típicos da literatura. Em cada intervalo, o valor destacado em negrito representa o parâmetro efetivamente adotado nas simulações no SIGMA/W..

A discretização em zonas funcionais permitiu representar o comportamento mecânico dos diferentes componentes da barragem, incluindo núcleo argiloso, enrocamento fino, enrocamento grosso, sistema de drenagem e materiais de fundação, cada qual caracterizado por propriedades compatíveis com sua função estrutural e hidráulica.

Os parâmetros geotécnicos apresentados na Tabela 1 foram definidos a partir de faixas típicas reportadas na literatura para barragens de terra e enrocamento [1,3,5,8]. Os valores destacados em negrito correspondem aos parâmetros efetivamente empregados nas simulações numéricas, selecionados como representativos dentro dos intervalos reportados para cada material.

2.3. Condições de contorno e cenários de carregamento

As condições de contorno foram estabelecidas para simular o comportamento global da barragem e minimizar distorções numéricas. A base do modelo foi considerada rígida, com restrições nas direções horizontal e vertical, representando o contato com substrato rochoso. As fronteiras laterais foram restringidas apenas na direção horizontal, configuração compatível com a hipótese de Estado Plano de Deformação adotada na análise bidimensional [1,3].

O processo de análise compreendeu duas etapas: (i) análise de percolação (SEEP/W), para obtenção do campo de poropressões em regime permanente; e (ii) análise mecânica (SIGMA/W), utilizando essas poropressões como condição inicial para o cálculo das tensões e deformações.

O tráfego sobre a crista, com 10 m de largura, foi modelado por carregamentos lineares distribuídos em estado plano de deformação, representando de forma equivalente o efeito médio dos eixos de veículos pesados, sem detalhar a interação pneu–pavimento. As cargas foram aplicadas em linhas paralelas espaçadas em 2,0 m, conforme a representação simplificada dos eixos veiculares sobre a crista [6,10].

Foram simulados três níveis de pressão simétricos em relação ao eixo da barragem: (i) 10 kPa, representando tráfego leve; (ii) 20 kPa, correspondente a operações regulares de veículos pesados; e (iii) 50 kPa, associado a cenários excepcionais de carregamento. Essa abordagem permite avaliar a sensibilidade da resposta mecânica do núcleo, especialmente em sua região superior, sob diferentes intensidades operacionais [3,4,6].

Apesar da natureza cíclica e temporal do tráfego real, este estudo adota carregamentos estáticos equivalentes para investigar os mecanismos fundamentais, particularmente a evolução das tensões desviadoras e do confinamento efetivo induzidos pelas cargas veiculares. Essa estratégia, consolidada em estudos conceituais, fornece uma base mecânica consistente para futuras investigações sobre efeitos cumulativos de longo prazo, como a previsão de taxas de deformação plástica e análises de *shakedown* [6,10].

2.4. Implementação numérica, geração de malha e pontos de monitoramento

A implementação numérica em regime bidimensional fundamenta-se na hipótese de estado plano de deformação, sendo justificada pela desprezível variação de

deformações ao longo do eixo longitudinal em barragens de grande extensão [1,3,10]. Para a solução das equações de equilíbrio e compatibilidade via MEF, utilizou-se uma discretização baseada em elementos quadrilaterais de ordem superior, organizados em uma malha não uniforme. Essa configuração prioriza a precisão por meio do refinamento progressivo no núcleo e topo do núcleo, áreas sujeitas a elevados gradientes de tensão pelo carregamento superficial, enquanto otimiza a eficiência computacional ao empregar elementos maiores nas zonas profundas e na fundação, onde a resposta mecânica é mais suave [3,6,10].

A análise detalhada da resposta mecânica do maciço foi conduzida por meio do monitoramento numérico de nós estratégicos da malha, posicionados no topo do núcleo e no interior do núcleo da barragem. A seleção desses pontos priorizou regiões com baixos níveis de confinamento e elevada sensibilidade a variações de tensão, conforme ilustrado na Figura 2. Em cada nó, foram extraídos dados de tensões, deformações e trajetórias de tensão no espaço q/p', permitindo identificar o estado tensional e a proximidade das condições de carregamento em relação aos regimes de comportamento do solo, o que fundamenta a interpretação dos resultados numéricos subsequentes.

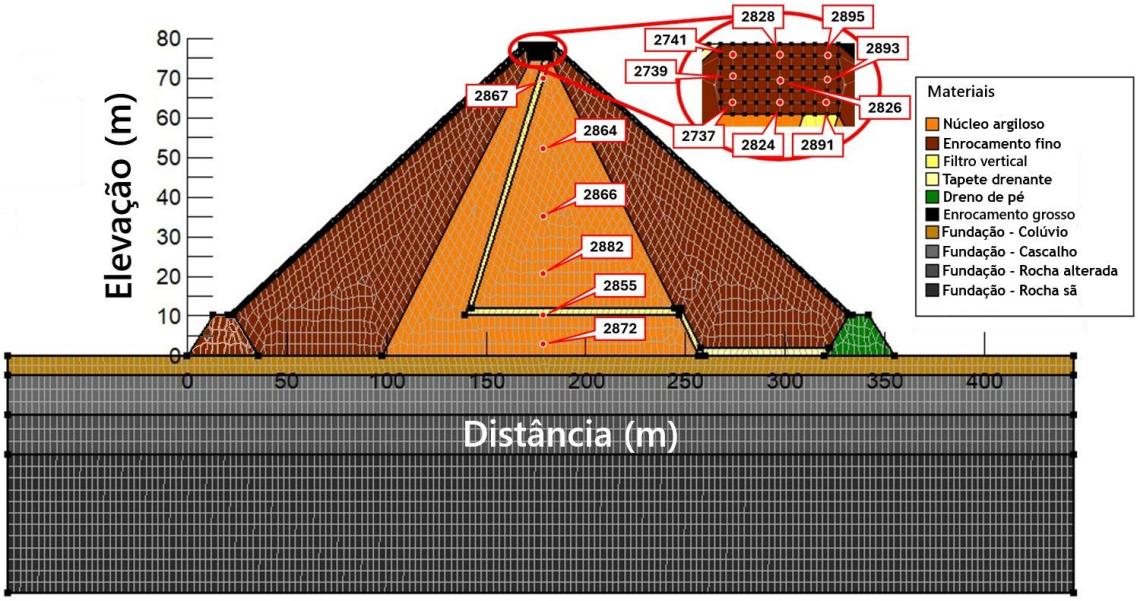


Figura 2 – Malha de elementos finitos e estratégia de refinamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta e discute os resultados das análises numéricas com foco na resposta mecânica e no comportamento tensão–deformação da barragem sob carregamentos veiculares na crista. A investigação prioriza os efeitos do tráfego nos deslocamentos verticais, na redistribuição e na concentração de tensões, além de avaliar a sensibilidade estrutural à magnitude da carga por eixo, fatores cruciais para a integridade funcional e segurança. Ressalta-se que os deslocamentos verticais são interpretados sob uma perspectiva comparativa e mecanicista, visando capturar tendências de comportamento e sensibilidade em vez de reproduzir assentamentos específicos de uma obra real.

3.1. Deslocamentos verticais induzidos pelo carregamento do veículo

Inicialmente, analisou-se o campo de deslocamentos da barragem após a aplicação do peso próprio e das poropressões, antes da introdução das cargas veiculares (Figura 3). A construção do aterro foi representada de forma simplificada, considerando a geometria final da barragem e a aplicação direta do peso próprio, sem simulação construtiva em etapas. Nessa condição, o recalque vertical máximo foi de aproximadamente 0,95 m (cerca de 1,2% da altura da barragem), concentrado no núcleo argiloso em razão de sua maior compressibilidade. Essa ordem de grandeza é compatível com os recalques globais observados em barragens de terra de grande porte após o estabelecimento do equilíbrio sob peso próprio e carregamentos hidráulicos, conforme descrito na literatura clássica de barragens [3].

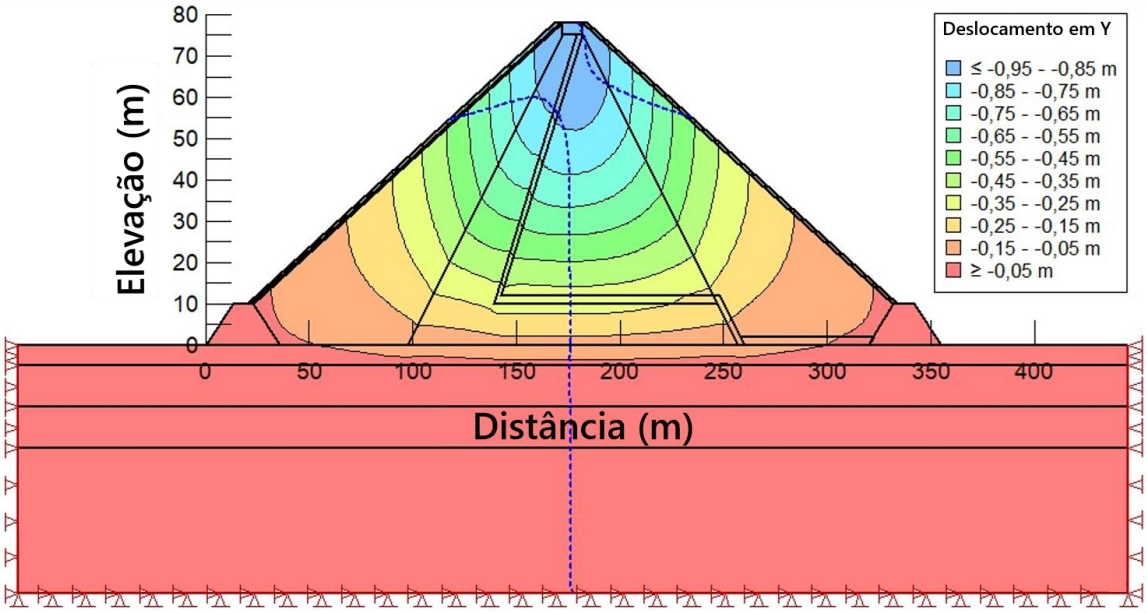


Figura 3 – Campo de deslocamentos verticais da barragem após a aplicação do peso próprio e das poropressões, antes da aplicação do carregamento veicular.

A aplicação das cargas equivalentes de 10, 20 e 50 kPa não produziu alterações significativas nos deslocamentos verticais ou horizontais, mantendo o recalque máximo praticamente inalterado em todos os cenários analisados. Esse comportamento era esperado, pois o peso próprio constitui a principal ação responsável pelo estado de deformação do maciço, enquanto as cargas veiculares representam incrementos localizados de pequena magnitude quando comparados às tensões geostáticas predominantes.

Os resultados obtidos no estágio de Carregamento indicam que a resposta global da estrutura é predominantemente governada pelo peso próprio e pelas ações hidráulicas, permanecendo a influência do tráfego restrita às camadas superficiais da crista em razão da rápida dissipação dos incrementos de tensão com a profundidade [6,10]. Entretanto, essa estabilidade global não exclui a ocorrência de redistribuições locais de tensões no topo do núcleo e em suas interfaces, regiões potencialmente mais suscetíveis ao desenvolvimento de deformações permanentes sob carregamentos repetidos. Por esse motivo, as seções seguintes concentram-se na análise detalhada do estado de tensões.

3.2. Distribuição e concentração de tensão no núcleo

Dada a baixa sensibilidade dos deslocamentos globais ao tráfego, a análise priorizou a redistribuição de tensões no topo do núcleo e em suas interfaces, onde o contraste de rigidez entre os materiais pode favorecer a elevação da tensão desviadora (q) e da razão de tensões (q/p'), parâmetros fundamentais para a avaliação do potencial de deformação localizada e do comportamento em *shakedown* [4,6].

3.2.1. Campo de tensão efetiva média (p') na condição inicial de equilíbrio

O campo de tensão efetiva média (p') foi utilizado para caracterizar o estado inicial de confinamento do núcleo antes da aplicação das cargas veiculares, sendo calculado a partir das tensões principais efetivas por:

$$p' = \frac{\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3'}{3} \quad (1)$$

Os resultados apresentados na Tabela 2 evidenciam que o confinamento efetivo no topo do núcleo não é uniforme, apresentando variação espacial mesmo antes da aplicação do carregamento veicular. Essa heterogeneidade indica que diferentes regiões do topo do núcleo operam sob distintos níveis de confinamento efetivo, condição que influencia diretamente a mobilização da resistência ao cisalhamento e a resposta mecânica às cargas superficiais [1,3].

Tabela 2 – Valores de tensão efetiva média (p') na condição inicial de equilíbrio.

Local	**Nó**	**Elevação (*Y*) (m)**	**Comprimento (*X*) (m)**	**Tensão Efetiva Média (p') (kPa)**
Topo do Núcleo	2737	75,60	173,00	133,04
	2739	76,60	173,00	383,05
	2741	77,60	173,00	364,42
	2824	75,60	177,00	537,05
	2826	76,60	177,00	568,07
	2828	77,60	177,00	447,09
	2891	75,60	180,00	463,67
	2893	76,60	180,00	357,17
	2895	77,60	180,00	342,18
Núcleo	2872	3,00	179,00	595,64
	2855	10,01	178,00	541,00
	2882	20,95	179,01	509,20
	2866	35,40	178,78	409,15
	2864	52,60	178,35	313,11
	2867	70,05	178,88	158,94

No interior do núcleo, observa-se um aumento progressivo de p' com a redução da elevação, atingindo valores da ordem de 595 kPa nas regiões mais profundas analisadas. Esse comportamento acompanha o crescimento das tensões geostáticas associadas ao peso próprio do maciço e é consistente com o esperado para barragens de terra e enrocamento, nas quais o confinamento médio do núcleo aumenta gradualmente com a profundidade [1,3]. Por outro lado, nas proximidades do topo do núcleo, em elevações próximas a 70 m, os valores de p' reduzem-se para aproximadamente 160 kPa, tornando a região superior do núcleo potencialmente mais sensível aos incrementos de tensão desviadora induzidos pelo carregamento superficial.

A distribuição das isolinhas de tensão efetiva média (Figura 4) é compatível com o efeito de arco, mecanismo pelo qual parte das cargas é transferida do núcleo para os espaldares mais rígidos devido ao contraste de deformabilidade entre os materiais. Como consequência, os valores de p' no núcleo mostraram-se inferiores aos normalmente esperados para uma distribuição geostática idealizada, em concordância com o comportamento clássico descrito para barragens zonadas [1,3].

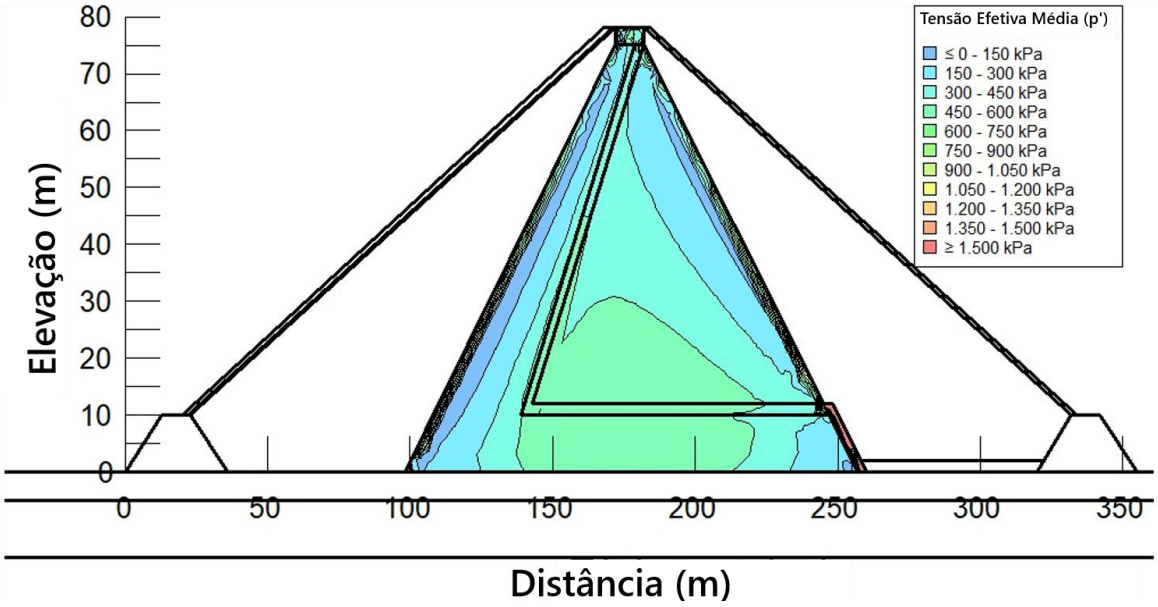


Figura 4 – Campo de tensão efetiva média (p') na condição inicial de equilíbrio, com recorte no núcleo argiloso e filtro vertical.

Nas proximidades da crista, o topo do núcleo apresentou os menores valores de tensão efetiva média, atingindo aproximadamente 133 kPa (nó 2737). Em comparação com as regiões mais profundas do núcleo, esses menores níveis de confinamento efetivo favorecem maior deformabilidade do material e aumentam sua sensibilidade aos incrementos de tensão induzidos pelo carregamento veicular, aspecto relevante para a interpretação dos resultados apresentados nas seções seguintes.

3.2.2. Campo de tensão desviadora (q) na condição inicial de equilíbrio

O campo de tensão desviadora (q) foi utilizado para caracterizar a distribuição inicial das tensões cisalhantes no núcleo antes da aplicação das cargas veiculares, sendo calculado a partir das tensões principais efetivas por:

$$q = \sigma_1' - \sigma_3' \quad (2)$$

Na condição inicial de equilíbrio, a análise do topo do núcleo revelou valores expressivos de tensão desviadora, variando entre 171,97 kPa e 563,25 kPa (Tabela 3). Os maiores valores concentram-se nos nós 2824 (550,26 kPa) e 2826 (563,25 kPa), localizados na interface núcleo–filtro. Essa distribuição é compatível com a concentração de tensões cisalhantes associada ao contraste de rigidez entre os materiais, comportamento amplamente descrito para barragens zonadas [1,3,6].

Tabela 3 – Valores de tensão desviadora (q) na condição inicial de equilíbrio.

Local	Nó	Elevação (*Y*) (m)	Comprimento (*X*) (m)	Tensão desviadora (q) (kPa)
Topo do Núcleo	2737	75,60	173,00	170,97
	2739	76,60	173,00	440,26
	2741	77,60	173,00	403,54
	2824	75,60	177,00	550,26
	2826	76,60	177,00	563,25
	2828	77,60	177,00	429,57
	2891	75,60	180,00	459,06
	2893	76,60	180,00	372,15
	2895	77,60	180,00	344,83
Núcleo	2872	3,00	179,00	425,33
	2855	10,01	178,00	528,84
	2882	20,95	179,01	392,08
	2866	35,40	178,78	271,38
	2864	52,60	178,35	140,28
	2867	70,05	178,88	111,32

No interior do núcleo, os valores de q apresentam um gradiente vertical bem definido. Nas regiões mais profundas, em elevações inferiores a aproximadamente 10 m, q atinge valores da ordem de 425–530 kPa, compatíveis com a maior solicitação cisalhante decorrente do peso próprio do maciço. Em direção às regiões superiores, observa-se redução progressiva de q, com valores da ordem de 110–140 kPa nas proximidades da elevação de 70 m, em consonância com a redução do confinamento efetivo nessa região.

A distribuição das isolinhas de tensão desviadora (Figura 5) mostra concentrações de q nas interfaces entre o núcleo argiloso e os filtros, padrão compatível com a concentração de esforços cisalhantes em regiões de contraste de rigidez entre materiais [1,3].

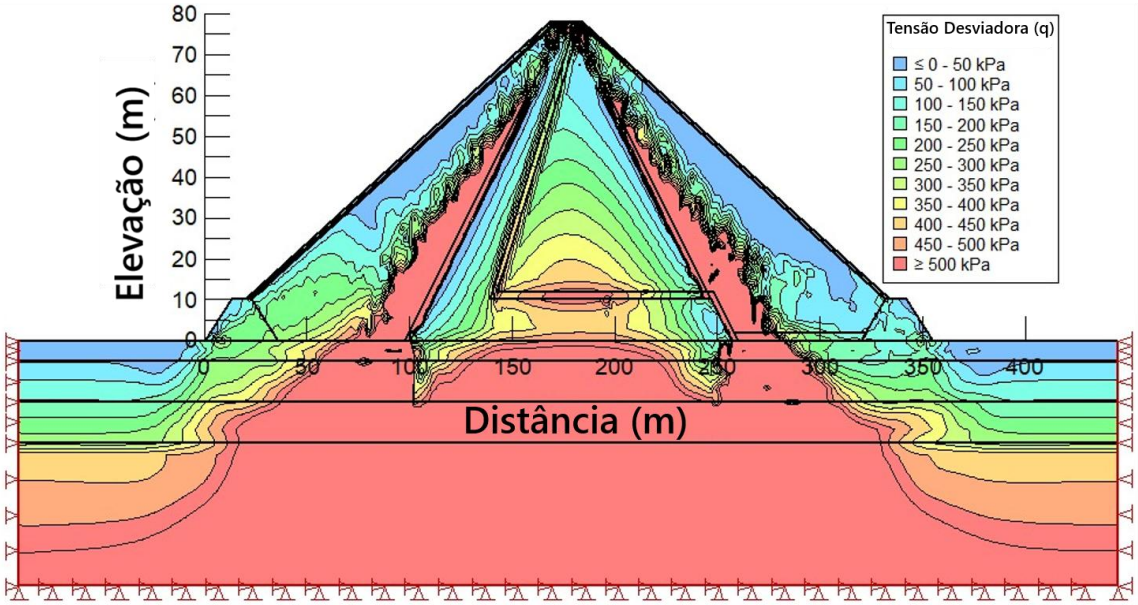


Figura 5 – Campo de tensão desviadora (q) na condição inicial de equilíbrio.

A integração dos resultados indica que, nas proximidades da crista, maiores valores de tensão desviadora coexistem com menores níveis de tensão efetiva média (p'). Essa combinação eleva a razão de tensões (q/p'), resultando em estados tensionais com maior mobilização da resistência ao cisalhamento.

Assim, a caracterização conjunta de p' e q na condição inicial de equilíbrio estabelece o referencial para a análise do comportamento do maciço no espaço de tensões, permitindo identificar regiões potencialmente críticas sob carregamentos adicionais na crista [6].

3.2.3. Razão de tensão (q/p') e potencial de Shakedown

A razão de tensões (q/p') relaciona a tensão desviadora ao confinamento efetivo, constituindo um dos principais indicadores da mobilização da resistência ao cisalhamento. Na teoria do *shakedown*, esse parâmetro permite classificar a resposta do material em três regimes principais: Faixa A, associada à adaptação estável; Faixa B, relacionada à fluência plástica; e Faixa C, associada ao colapso incremental [6,10,15].

Nesta análise, a condição inicial de equilíbrio foi utilizada como referência para avaliar a resposta do núcleo frente ao carregamento veicular de 50 kPa. A Figura 6 e a Tabela 4 indicam que os maiores valores de q/p' concentram-se no topo do núcleo e nas interfaces núcleo–filtro. Nessas regiões, a combinação entre menores níveis de confinamento efetivo e maiores tensões desviadoras resulta em elevada mobilização da resistência ao cisalhamento, aproximando o estado tensional dos limites associados às Faixas B e C.

Os valores da Tabela 4 mostram que, na condição inicial de equilíbrio, a razão q/p' no topo do núcleo situa-se predominantemente próxima ou acima da unidade, variando entre 0,96 e 1,29. Esses valores indicam elevada mobilização resistente, embora a barragem permaneça em equilíbrio sob as ações permanentes. No interior do núcleo,

os valores variam entre 0,44 e 0,98, indicando menor mobilização relativa em comparação ao topo, especialmente nas regiões mais confinadas.

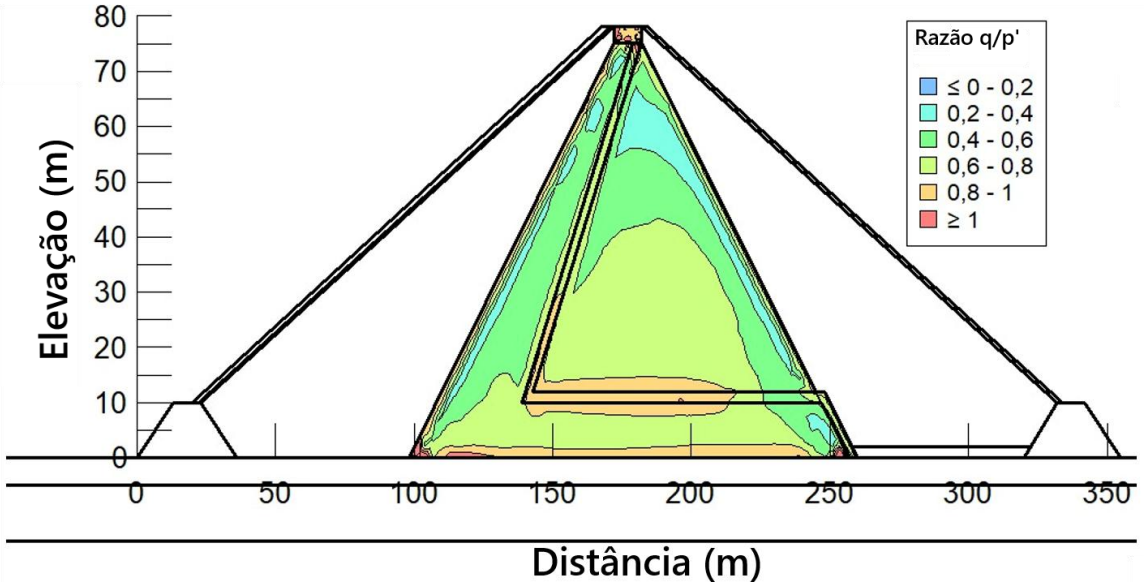


Figura 6 – Distribuição espacial da razão de tensão (q/p') na condição inicial de equilíbrio.

Tabela 4 – Valores de razão de tensão (q/p') na condição inicial de equilíbrio e sob carregamento veicular de 50 kPa.

Local	Nó	Elevação (*Y*) (m)	Comprimento (*X*) (m)	razão q/p' (condição inicial)	razão q/p' (50 kPa)
Topo do Núcleo	2737	75,60	173,00	1,2851	1,2681
	2739	76,60	173,00	1,1494	1,1565
	2741	77,60	173,00	1,1074	1,1042
	2824	75,60	177,00	1,0246	1,0218
	2826	76,60	177,00	0,9915	0,9994
	2828	77,60	177,00	0,9608	0,9622
	2891	75,60	180,00	0,9900	0,9727
	2893	76,60	180,00	1,0419	1,0671
	2895	77,60	180,00	1,0077	1,0255
Núcleo	2872	3,00	179,00	0,7140	0,7141
	2855	10,01	178,00	0,9775	0,9775
	2882	20,95	179,01	0,7701	0,7700
	2866	35,40	178,78	0,6633	0,6633
	2864	52,60	178,35	0,4481	0,4480
	2867	70,05	178,88	0,6947	0,7004

Observa-se que a distribuição espacial das regiões com maiores valores de q/p' permanece praticamente inalterada entre a condição inicial de equilíbrio e o carregamento veicular de 50 kPa. Assim, o efeito do carregamento veicular consiste

principalmente na intensificação local da mobilização resistente, sem modificar significativamente a localização das zonas críticas previamente estabelecidas pelo estado de tensões da barragem.

Sob a ótica da teoria do *shakedown*, os resultados indicam que a combinação entre menor confinamento efetivo no topo do núcleo ($p' \approx 133$ kPa) e elevadas tensões desviadoras nas interfaces ($q > 560$ kPa) produz os maiores valores de q/p' do modelo. Esse comportamento aproxima essas regiões dos estados tensionais associados à Faixa B, enquanto o núcleo profundo, beneficiado pelo maior confinamento efetivo ($p' \approx 595$ kPa), permanece submetido a menores níveis de mobilização resistente.

3.2.4. Tensões verticais totais e papel secundário na resposta ao tráfego

A Figura 7 apresenta o campo de tensão total vertical (σ_y) para o cenário com carregamento veicular de 50 kPa aplicado sobre a crista da barragem. A análise das isolinhas evidencia que a distribuição de σ_y é governada predominantemente pelo peso próprio do maciço e pela geometria da barragem, resultando em um gradiente vertical característico, com aumento progressivo das tensões em direção às regiões mais profundas do núcleo. Esse comportamento é consistente com resultados clássicos e recentes para barragens de terra e enrocamento, nos quais o estado de tensões totais é controlado majoritariamente por efeitos geostáticos [1,3].

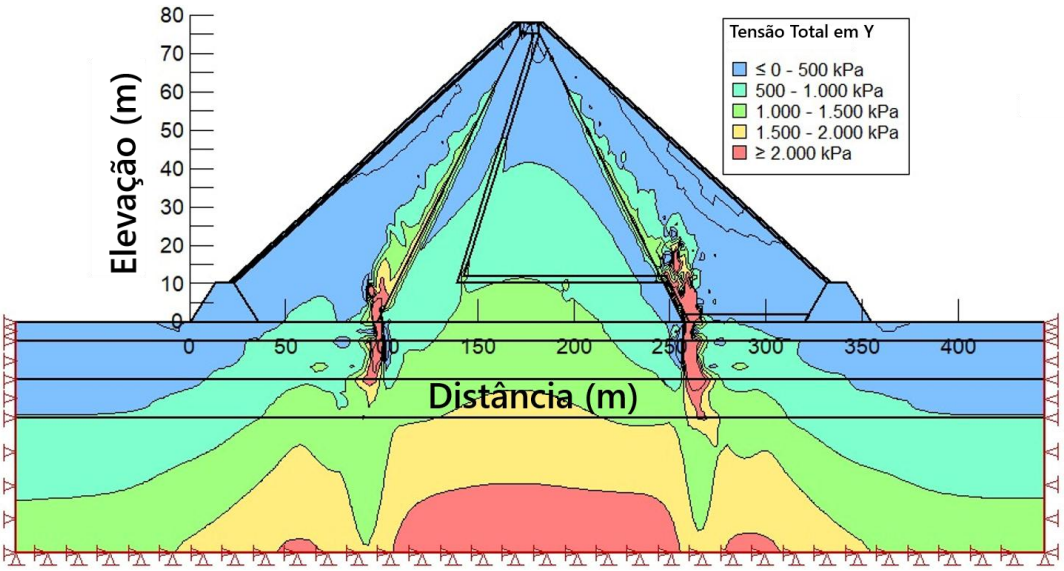


Figura 7 – Distribuição espacial da tensão vertical total (σ_y) sob uma carga veicular de 50 kPa aplicada na crista.

A influência do tráfego sobre a tensão vertical total (σ_y) dissipa-se rapidamente nas camadas superficiais, conforme o conceito de profundidade de influência. Segundo essa teoria, os incrementos de tensão por cargas localizadas tornam-se desprezíveis frente às tensões geostáticas com o aumento da profundidade [6,10]. Assim, um carregamento veicular de 50 kPa na crista não altera significativamente o equilíbrio global das tensões totais da estrutura.

Concentrações locais de σ_y nas interfaces núcleo–filtro, decorrentes da diferença de rigidez entre os materiais, sofrem pequena variação com o carregamento veicular. Esse resultado indica que a tensão vertical total, quando analisada isoladamente, possui capacidade limitada para diagnosticar alterações induzidas pelo tráfego ou avaliar o potencial de *shakedown*.

Os efeitos do carregamento veicular são mais bem representados pelas tensões desviadoras (q) e pela razão de tensões (q/p'), parâmetros mais sensíveis às alterações locais do estado de tensões. Esse resultado está em concordância com estudos que apontam limitações de análises baseadas exclusivamente em tensões totais para avaliar a resposta mecânica de barragens submetidas ao tráfego [6,10].

3.2.5. Concentração de tensões cisalhantes e interação núcleo–filtro

A Figura 8 ilustra a distribuição da tensão cisalhante máxima ($\tau_{\max}$) sob carregamento veicular de 50 kPa, evidenciando concentrações de tensão cisalhante ao longo das interfaces entre o núcleo argiloso e os filtros e nas proximidades da crista.

Esse padrão decorre da interação cinemática entre materiais de rigidezes distintas: o núcleo argiloso, mais compressível, tende a deformar-se mais que os filtros e enrocamentos adjacentes. A compatibilização das deformações entre esses materiais mobiliza tensões cisalhantes elevadas nas interfaces, mecanismo compatível com o efeito de arco [1,3].

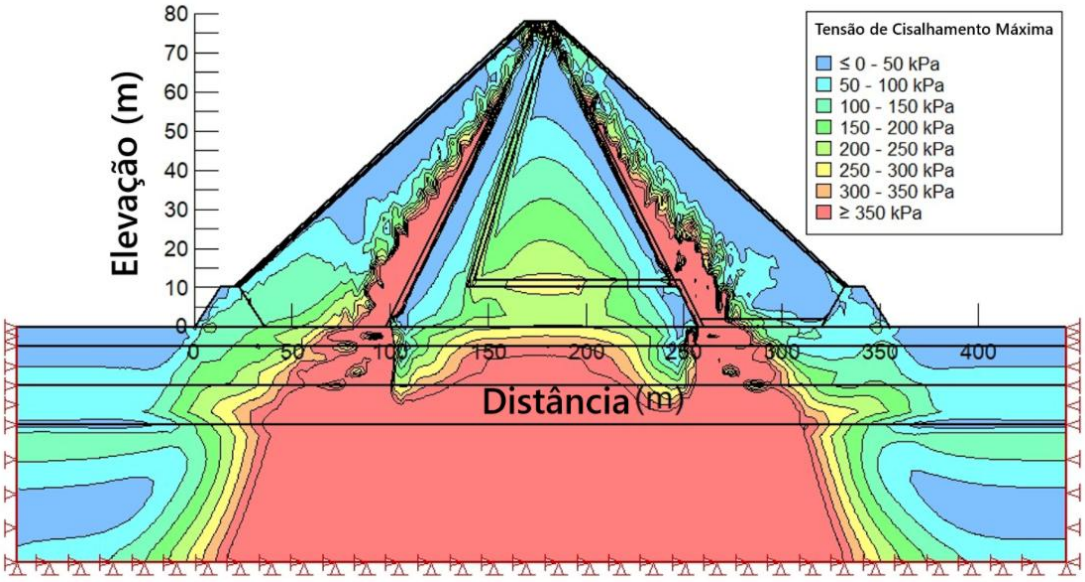


Figura 8 – Distribuição da tensão de cisalhamento máxima ($\tau_{\max}$) sob carregamento veicular de 50 kPa.

Embora os valores de $\tau_{\max}$ apresentem magnitude reduzida em escala global, sua distribuição é espacialmente seletiva, concentrando-se nas interfaces núcleo–filtro adjacentes ao topo do núcleo. Esse padrão indica que o tráfego contribui principalmente para concentrações locais de tensões cisalhantes, sem alterar significativamente o regime tensional profundo, onde predomina maior confinamento efetivo. Sob a ótica do *shakedown*, a combinação entre maior cisalhamento

mobilizado e menor confinamento efetivo aproxima essas regiões dos estados tensionais associados à Faixa B [6,10].

As regiões de maior $\tau_{\max}$ coincidem espacialmente com aquelas previamente identificadas como críticas pelas distribuições de p', q e q/p', reforçando a consistência da interpretação mecânica obtida pela modelagem numérica.

Embora o carregamento tenha sido simulado como ação estática equivalente, os resultados indicam que as interfaces núcleo–filtro e o topo do núcleo constituem as áreas mais suscetíveis ao acúmulo de deformações plásticas. Na prática, sob carregamentos repetidos, essa suscetibilidade pode evoluir para manifestações de dano funcional, como recalques diferenciais, trilhas de roda ou fissuração longitudinal da crista, afetando a integridade operacional da barragem [6,10].

3.2.6. Razão q/p' e identificação de zonas críticas no topo do núcleo

A Figura 9 detalha a região da crista sob carregamento veicular de 50 kPa, evidenciando que o topo do núcleo e suas interfaces apresentam razões q/p' elevadas. Observam-se zonas com $q/p' > 0{,}80$ e picos próximos ou superiores à unidade nas camadas superficiais. Esse cenário indica elevada mobilização da resistência ao cisalhamento sob menor confinamento efetivo, caracterizando regiões potencialmente mais suscetíveis ao desenvolvimento de deformações permanentes.

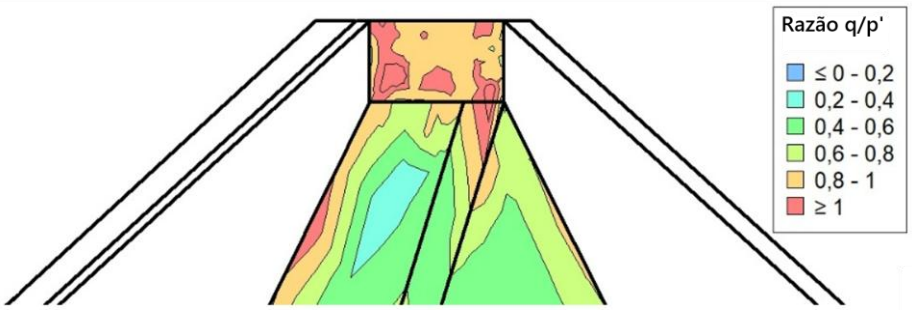


Figura 9 – Razão de tensões (q/p') na crista sob carregamento veicular de 50 kPa.

Esse padrão resulta da combinação entre elevadas tensões desviadoras (q) e menor confinamento efetivo (p') no topo do núcleo, condição associada ao efeito de arco [1,10]. Segundo a teoria do *shakedown*, valores elevados de q/p' aproximam essas regiões da Faixa B, indicando maior mobilização da resistência ao cisalhamento sob carregamentos repetidos [6].

Embora baseada em carregamento estático equivalente, a análise indica que o topo do núcleo e as interfaces núcleo–filtro são as regiões mais suscetíveis ao desenvolvimento de deformações permanentes sob carregamentos repetidos. Nessas áreas, a elevada razão q/p' e o menor confinamento efetivo podem favorecer recalques localizados, trilhas de roda e fissuração longitudinal da crista [6,10].

A Figura 9 reforça que o topo do núcleo e suas interfaces concentram as regiões mecanicamente mais solicitadas da barragem, em concordância com as distribuições de p', q e $\tau_{\max}$.

3.3. Influência da magnitude da carga por eixo

Esta seção avalia o efeito da magnitude da carga por eixo na resposta mecânica do topo do núcleo, com foco na sensibilidade diferencial dos incrementos de tensão efetiva média ($\Delta p'$) e tensão desviadora (Δq), bem como na evolução da razão de tensões (q/p') em regiões de menor confinamento efetivo. Foram simulados três níveis de carregamento na crista: 10 kPa, 20 kPa e 50 kPa, permitindo avaliar a mobilização da resistência ao cisalhamento em consonância com as recomendações do ICOLD [16] para o monitoramento do desempenho e da segurança de barragens.

3.3.1. Sensibilidade diferencial de p' e q ao aumento da carga

A Figura 10 apresenta os perfis verticais dos incrementos de tensão efetiva média ($\Delta p'$) e tensão desviadora (Δq), calculados em relação à condição inicial de equilíbrio. Observa-se que ambos aumentam com a elevação da carga aplicada; entretanto, Δq apresenta maior sensibilidade ao aumento do carregamento, principalmente nas proximidades da crista.

Os incrementos de p' permanecem restritos às camadas superficiais, indicando pequeno aumento do confinamento efetivo em profundidade [6,10]. Em contraste, os incrementos de q aumentam de forma mais pronunciada na região superior do núcleo, elevando a razão q/p' nas regiões de menor confinamento. Essa resposta diferencial indica comportamento mecânico não linear nas proximidades da crista.

Esse comportamento aproxima o estado tensional das condições associadas às Faixas B e C da teoria do *shakedown* para o carregamento de 50 kPa [15]. Os resultados reforçam que a resposta mecânica do núcleo é predominantemente controlada pela evolução das tensões desviadoras, evidenciando a razão q/p' como indicador mais sensível, em comparação aos deslocamentos globais e às tensões médias, para a avaliação dos efeitos do tráfego sobre a barragem.

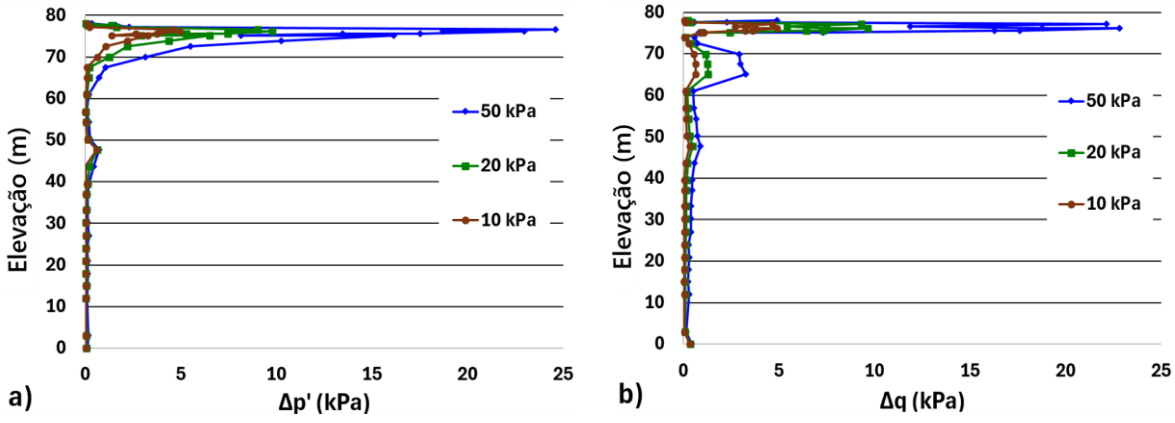


Figura 10 – Variação incremental das tensões efetivas no núcleo em função da magnitude do carregamento veicular: (a) incremento da tensão efetiva média ($\Delta p'$) e (b) incremento da tensão desviadora (Δq), para cargas de 10 kPa, 20 kPa e 50 kPa.

3.3.2. Evolução da razão q/p' e transição de regimes de shakedown

Independentemente da magnitude do carregamento, os maiores valores de q/p' concentram-se no topo do núcleo e nas interfaces núcleo–filtro. Esse comportamento

decorre da combinação entre menor confinamento efetivo (p') e maiores tensões desviadoras (q), associadas ao contraste de rigidez entre os materiais [1,3].

A Tabela 7 mostra que a razão q/p' no topo do núcleo permanece próxima ou superior à unidade em todos os cenários analisados. Enquanto os carregamentos de 10 e 20 kPa produzem alterações discretas, a carga de 50 kPa promove modificações localizadas na mobilização da resistência ao cisalhamento, mantendo as maiores razões concentradas nas interfaces. No interior do núcleo, os valores permanecem menores e praticamente constantes devido ao maior confinamento efetivo proporcionado pelo peso próprio do maciço [1,8].

Tabela 7 – Evolução da razão de tensões (q/p') na crista e no núcleo sob diferentes magnitudes de carregamento veicular.

Local	**Nó**	**q/p' (condição inicial)**	**q/p' (10 kPa)**	**q/p' (20 kPa)**	**q/p' (50 kPa)**
Topo do Núcleo	2737	1,2851	1,2858	1,2856	1,2681
	2739	1,1494	1,1473	1,1424	1,1565
	2741	1,1074	1,1070	1,1086	1,1042
	2824	1,0246	1,0260	1,0261	1,0218
	2826	0,9915	0,9920	0,9912	0,9994
	2828	0,9608	0,9612	0,9609	0,9622
	2891	0,9901	0,9909	0,9851	0,9727
	2893	1,0419	1,0342	1,0249	1,0671
	2895	1,0077	1,0092	1,0074	1,0255
Núcleo	2872	0,7140	0,7140	0,7139	0,7141
	2855	0,9775	0,9775	0,9774	0,9775
	2882	0,7701	0,7701	0,7702	0,7700
	2866	0,6633	0,6635	0,6637	0,6633
	2864	0,4481	0,4485	0,4490	0,4480
	2867	0,6947	0,6928	0,6876	0,7004

Sob a ótica da teoria do *shakedown*, valores mais elevados de q/p' indicam maior mobilização da resistência ao cisalhamento e maior suscetibilidade ao desenvolvimento de deformações permanentes sob carregamentos repetidos [6,15]. Em consonância com as recomendações do ICOLD [12], os resultados reforçam a importância do controle do tráfego pesado sobre a crista para preservar o desempenho estrutural e a segurança da barragem.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho investigou, por meio de modelagem numérica bidimensional por elementos finitos com acoplamento hidromecânico, a resposta mecânica de uma barragem de terra e enrocamento submetida a carregamentos veiculares na crista. Para a geometria, propriedades geotécnicas, condições de contorno e modelo constitutivo adotados, os resultados indicaram que os deslocamentos globais são predominantemente governados pelo peso próprio e pelas poropressões, enquanto os efeitos do tráfego concentram-se na redistribuição local de tensões, especialmente no topo do núcleo e nas interfaces núcleo–filtro.

Na condição inicial de equilíbrio, o topo do núcleo apresentou menores níveis de confinamento efetivo (p') e maiores valores da razão de tensões (q/p') em relação às regiões mais profundas do maciço. O aumento da magnitude do carregamento elevou principalmente a tensão desviadora (q), enquanto os incrementos de confinamento efetivo (p') permaneceram restritos às camadas superficiais, intensificando a mobilização da resistência ao cisalhamento nas regiões críticas identificadas.

Sob a ótica da teoria do *shakedown*, os resultados indicam que o aumento da carga veicular aproxima o estado tensional das regiões superficiais dos regimes associados à fluência plástica, enquanto as regiões profundas do núcleo permanecem pouco sensíveis ao carregamento devido ao maior confinamento efetivo. Assim, para as hipóteses adotadas nesta modelagem, o efeito do tráfego está associado principalmente à possibilidade de danos funcionais localizados na crista, e não a alterações significativas da estabilidade global da barragem.

As conclusões apresentadas são válidas para a geometria analisada, condições de carregamento e contorno consideradas, parâmetros geotécnicos adotados e modelo constitutivo empregado. Estudos futuros utilizando modelos constitutivos mais avançados, análises tridimensionais e carregamentos cíclicos poderão ampliar a compreensão da evolução das deformações permanentes e do comportamento de longo prazo de barragens submetidas ao tráfego veicular.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. (2005) – “Geotechnical Engineering of Dams”, livro técnico de engenharia geotécnica, 2. ed., Balkema, Rotterdam.

[2] KONIETZKY, H. (2020) – “Dam Constructions”, documento técnico de engenharia de barragens, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.

[3] BEIRANVAND, B.; KOMASI, M. (2021) – “An Investigation on Dam Settlement During and End of Construction Using Instrumentation Data and Numerical Analysis”, artigo científico em engenharia geotécnica de barragens, SN Applied Sciences, v. 3, n. 306.

[4] PÉREZ-GONZÁLEZ, E. L.; BILODEAU, J.-P.; DORÉ, G. (2021) – “Analysis Model for Permanent Deformation in Granular Materials under the Action of Superheavy

Vehicles", artigo científico em geotecnia de transportes, Transportation Geotechnics, v. 28, p. 100536.

[5] FANG, H.; ZHANG, H.; XUE, B.; GAO, J.; LI, Y.; GAO, X.; TIAN, A. (2022) – "Coordination Characteristics Analysis of Deformation between Polymer Anti-Seepage Wall and Earth Dam under Traffic Load", artigo científico em engenharia de barragens e geotecnia, Water, v. 14, n. 9., p. 1442.

[6] PÉREZ-GONZÁLEZ, E.; BILODEAU, J.-P.; DORÉ, G.; DORÉ-RICHARD, S. (2021) – "Assessment of the Permanent Deformation at the Earth Core of a Rockfill Dam under Heavy Vehicle Loading", artigo científico em geotecnia de barragens, Canadian Geotechnical Journal, v. 58, n. 2, p. 165-175. Ottawa.

[7] PÉREZ-GONZÁLEZ, E.; BILODEAU, J.-P.; DORÉ, G.; DORÉ-RICHARD, S. (2019) – "Characterization of the Mechanical Response at the Earth-Core of a Rockfill Dam under Heavy Vehicle Loading", Cold Regions Engineering 2019, engenharia geotécnica em regiões frias, ASCE, Reston.

[8] BEIRANVAND, B.; RAJAEE, T.; KOMASI, M. (2024) – "Spatiotemporal Clustering of Dam Settlement Monitoring Using Instrumentation Data (Case Study: Eyvashan Earth Dam)", artigo científico em engenharia de barragens e geotecnia, Results in Engineering, v. 22, p. 102014, Amsterdam.

[9] ZHENG, X.; REN, T.; LV, F.; WANG, Y.; ZHENG, S. (2024) – "Settlement Prediction for Concrete Face Rockfill Dams Considering Major Factor Mining Based on the HHO-VMD-LSTM-SVR Model", artigo científico em engenharia de barragens e modelagem preditiva, Water, v. 16, n. 12., p. 1643.

[10] BLANCHETTE, M.; BILODEAU, J.-P.; PEREZ, E.; FRÉCHETTE, V.; DORÉ-RICHARD, S. (2025) – "Development of Decision-Making Tools for Regulating Heavy Vehicle Passage on Embankment Dams", artigo científico em engenharia de barragens e gestão de tráfego, SSRN Electronic Journal, [S.l.].

[11] ACSELRAD, H. (2019) – "A 'Memória Técnica' das Grandes Barragens: Considerações sobre a Aplicação da Noção de Memória a Fatos Técnicos", artigo científico em estudos socioambientais de barragens, Novos Estudos CEBRAP, v. 38, n. 2, São Paulo.

[12] ICOLD (INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS) (2020) – "General Principles and Framework for Dam Safety", boletim técnico sobre segurança de barragens, ICOLD, Paris.

[13] ELETRONORTE (1989) – "Usina Hidrelétrica de Tucuruí: Memória Técnica", documento técnico de engenharia de barragens, Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A., Brasília.

[14] BUDHU, M. (2011) – "Soil Mechanics and Foundations", livro técnico de mecânica dos solos e fundações, John Wiley & Sons, Hoboken.

[15] WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F. (2005) – "Permanent Deformation Behaviour of Granular Materials", artigo científico em geotecnia de pavimentos e materiais granulares, Road Materials and Pavement Design, v. 6, n. 1, London.

[16] ICOLD (INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS) (2020) – “Dam safety management: operational phase of the dam life cycle”, boletim técnico 154 sobre segurança de barragens, ICOLD, Paris.

[17] KORKIALA-TANTTU, L.; LAAKSONEN, R.; TÖRNQVIST, J. (2003) – “Effect of spring and overload on the rutting of a low-volume road”, VTT Technical Research Centre of Finland, Helsinki.

	**Eduarda Lima de SOUZA** Engenheira Civil pela UFPA, com experiência em acompanhamento de obras, planejamento, orçamentos e medições. Atualmente trabalha como analista no Centro de Monitoramento de Barragens da Vale S.A pela GroundProbe/Orica. Mestranda em Engenharia de Segurança de Barragens e Gestão Ambiental (UFPA).
	**Aldenora Vieira SANTOS NETA** Engenheira Civil (UNICEUMA) com experiência em projetos de ferrovias e gestão de operação de barragens. Atualmente trabalha nas etapas do ciclo de vida de barragens e lagos, desde operação, manutenção, monitoramento e inspeção. Especialista em Engenharia Geotecnia (UFPA e NAVIGARE). Mestranda em Engenharia de Segurança de Barragens e Gestão Ambiental (UFPA).
	**Davi Carvalho MOREIRA** Engenheiro Eletricista com Doutorado (UFPA) e Mestrado em Engenharia de Segurança de Barragens (UFPA). Experiência na UHE Tucuruí em operação, manutenção e projetos. Professor adjunto da UFPA e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Segurança de Barragens (PEBGA), atualmente é coordenador do PEBGA.
	**Caio Carvalho MOREIRA** Possui graduação (2011) em Engenharia da Computação, Mestrado (2013) e Doutorado (2024) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará. Atualmente é Professor Adjunto da UFPA, atuando principalmente nos seguintes temas: segurança de sistemas, segurança de redes e aprendizado de máquina.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.1
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

Avaliação de Métodos para Dimensionamento de Drenagem Interna em Barragens de Terra

Thales BASILIO
Engenheiro Civil - INTERTECHNE

Ingrid VIANA
Engenheira Geotécnica - GWS Engenharia

Aline ANDALICIO
Engenheira Geotécnica - INTERTECHNE

Samantha CASAZZA
Engenheira Geotécnica - INTERTECHNE

Vitória QUEIROZ
Engenheira Geotécnica - INTERTECHNE

RESUMO

As barragens de terra são amplamente empregadas em empreendimentos de diversos setores da economia, principalmente em função de condições topográficas favoráveis à sua implantação e de sua viabilidade técnico-econômica. No entanto, a segurança geotécnica do barramento está diretamente ligada ao controle do fluxo percolado através do maciço. Dessa forma, torna-se fundamental o correto dimensionamento dos dispositivos de drenagem interna e a adequada seleção dos materiais empregados. O presente artigo tem como objetivo discutir e avaliar técnicas utilizadas no dimensionamento do filtro vertical, do tapete drenante horizontal e das transições geotécnicas de uma barragem de terra. Para isso, analisou-se um estudo de caso no qual as vazões afluentes ao sistema de drenagem foram determinadas por modelagem pelo Método dos Elementos Finitos. A partir dessas vazões, os dispositivos foram dimensionados pela Lei de Darcy. Para a definição das transições geotécnicas, foram avaliadas as granulometrias do aterro compactado, do solo residual e dos materiais drenantes, adotando-se os critérios de Terzaghi e Peck (1962), Cruz (2004) e Fell et al. (2005). Os resultados permitiram definir as espessuras dos dispositivos e as faixas granulométricas dos materiais. Verificou-se que, embora os métodos avaliados sejam tecnicamente adequados, existem diferenças entre os limites estabelecidos por cada metodologia. Assim, a escolha do método deve considerar as especificidades do projeto e as características dos materiais.

ABSTRACT

Earth dams are widely used in projects across various sectors of the economy, mainly due to favorable topographic conditions for their construction and their technical and economic feasibility. However, the geotechnical safety of the dam is directly related to the control of seepage flow through the embankment. Therefore, the proper design of internal drainage devices and the appropriate selection of the materials used are essential. This article aims to discuss and evaluate techniques applied to the design of the vertical filter, the horizontal drainage blanket, and the geotechnical transitions of an earth dam. For this purpose, a case study was analyzed in which the inflows to the drainage system were determined through numerical modeling using the Finite Element Method. Based on these flow rates, the drainage devices were designed using Darcy's Law. For the definition of the geotechnical transitions, the particle-size distributions of the compacted fill, residual soil, and drainage materials were evaluated using the criteria proposed by Terzaghi and Peck (1962), Cruz (2004), and Fell et al. (2005). The results allowed the definition of the device thicknesses and the particle-size ranges of the materials. It was found that, although the evaluated methods are technically suitable, differences exist among the limits established by each methodology. Therefore, the choice of method should consider the specific characteristics of the project and the materials involved.

1. INTRODUÇÃO

Em barragens formadas por maciço em solo, quando da formação do reservatório, o fluxo em regime permanente faz com que uma porção do aterro seja submetida à saturação e a outra, encontre-se não saturada. Na porção sob a linha freática formada com a percolação, existe a geração de pressões neutras positivas que diminuem a resistência ao cisalhamento do maciço a ponto de levar à falha por instabilização e/ou, a depender dos gradientes hidráulicos impostos, à ocorrência de erosão regressiva com potencial de conduzir a um processo de ruptura por *"piping"*. Nesse contexto, faz-se necessário disciplinar o fluxo percolado no interior do maciço a partir de um sistema de drenagem interna. Segundo [1], tais sistemas devem ser permeáveis o bastante para garantir que a percolação ocorra sem o desenvolvimento de pressões excessivas e com vazios pequenos o bastante para prevenir a passagem dos materiais protegidos, incluindo o solo do aterro e, quando aplicável, os materiais de fundação em contato com os dispositivos de drenagem.

Em geral, o dimensionamento de drenagem interna é realizado visando a definição geométrica do sistema (*"layout"*, espessura e declividade), que depende das redes de fluxo impostas ao maciço, as quais irão ditar as vazões impostas ao sistema. Para tanto, a lei de Darcy [2] pode ser empregada para se obter as velocidades de fluxo e, em função da permeabilidade do dreno e do gradiente hidráulico imposto, se determinar a espessura mínima das camadas. Há de se dimensionar, também, a espessura e intervalos granulométricos das transições e materiais do sistema, de modo a garantir sua filtragem e permeabilidade [3], [4] e [5].

A viabilidade de diversas atividades econômicas desenvolvidas no Brasil, como a mineração, geração de energia, agricultura, abastecimento de água etc. depende, em muitos dos casos, de grandes barragens de terra, devido a questões relacionadas, sobretudo, à disponibilidade de materiais de construção e ao relevo, propício para o acúmulo de volumes importantes ao longo dos vales. Sendo assim, para o desenvolvimento nacional, é imperativo o domínio de técnicas de projeto, construção e operação de barragens de modo a garantir sua segurança. O dimensionamento, construção e monitoramento do sistema de drenagem interna de barragens de terra representam papel importante no desempenho e segurança dessas estruturas.

Assim, o presente artigo tem por objetivo avaliar métodos de dimensionamento hidráulico e geotécnico dos sistemas de drenagem interna, apreciando-se a literatura técnica e científica relacionada ao tema, com a finalidade de se unificar os procedimentos aplicáveis a barragens de terra em território brasileiro. Foram apreciados métodos consagrados de dimensionamento e, a partir de curvas granulométricas de materiais-base reais, definiu-se intervalos granulométricos das transições geotécnicas por distintos procedimentos. Importante ressaltar que o presente trabalho se restringe a barragens de terra com aterro argiloso, que apresenta condições de fluxo, anisotropia e comportamento distintas de outras modalidades de maciço, como o enrocamento [6].

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem o intuito de apresentar os métodos consagrados em literatura para o dimensionamento hidráulico e geotécnico de sistemas de drenagem interna de barragens de terra. Para o fluxo em meios porosos, o procedimento mais aceito pela comunidade geotécnica é a aplicação da Lei de Darcy, resguardadas suas premissas, como a de que o escoamento é laminar, com número de *"Reynolds"* inferior a 200 (Re < 200). Uma vez que é comumente utilizada a areia e brita 0 em drenos de barragens de terra, tal premissa, a depender do gradiente hidráulico, é comumente satisfeita em estruturas brasileiras.

Com isso, sabe-se que a vazão (Q) é função da permeabilidade (k), gradiente hidráulico, ou de pressão, (i) e da área de seção transversal pela qual ocorre o fluxo (A), sendo estimada pela Lei de Darcy com:

$$\boldsymbol{Q = k\, i\, A} \qquad \text{Equação 1}$$

Geralmente, é admitido o emprego de ferramentas computacionais para tal estimativa, como a geração de redes de fluxo em regime permanente por programas que se valem do método de elementos finitos para este fim. Destaca-se que o mais importante nesse processo é a representatividade das condições de contorno e a ideal caracterização dos materiais, de modo que as variáveis sejam estimadas de maneira assertiva e sob baixo nível de incerteza.

Para o dimensionamento das transições geotécnicas, porém, existem variados métodos na literatura científica, a citar: [3], [4], [5] e [9]. Abaixo, são detalhadas, de maneira resumida, as nuances metodológicas apresentadas por cada um dos autores citados.

[3] propuseram é que a drenagem interna deve satisfazer duas premissas para o ideal funcionamento e segurança das barragens de terra, a saber:

- Critério de Filtragem: As dimensões dos vazios no material do filtro ($\boldsymbol{D_{15,F}}$) devem ser suficientemente pequenas para reter as partículas maiores do material protegido ($\boldsymbol{D_{85,B}}$), devendo ser satisfeita a condição:

$$\boldsymbol{D_{15,F} \Big/ D_{85,B} \leq 4\ ou\ 5} \qquad \text{Equação 2}$$

- Critério de Permeabilidade: O material do filtro deve ter alta condutividade hidráulica para impedir a geração de grandes forças de percolação e pressões hidrostáticas aplicadas aos filtros, devendo ser satisfeita a condição:

$$\boldsymbol{D_{15,F} \Big/ D_{15,B} \geq 4\ ou\ 5} \qquad \text{Equação 3}$$

[5] apresentam o método baseado no enquadramento do solo base em função de critérios granulométricos relacionados à porcentagem passante na peneira #200. Para cada um dos agrupamentos, os autores apresentam uma maneira distinta para se obter os limites de D_{15F} máximo. Para o critério de filtragem (D_{15F} mínimo), o cálculo é realizado de maneira similar ao de [3]. Ao todo, são descritos 09 (nove) passos para a definição dos intervalos granulométricos das transições geométricas, que vão desde a correção das curvas granulométricas até a definição de diâmetros característicos dos limites dos intervalos.

[4] apresentam critérios para a definição de transições geotécnicas em função das interfaces. Importante destacar que são apresentadas, também, restrições quanto ao coeficiente de não uniformidade, que deve se situar entre 3 e 20, além de critérios para definição dos diâmetros característicos dos filtros. Vale aqui citar que são apresentados os critérios para interface de material granular/material granular, que é aplicável para os casos de transições entre britas, cascalhos e enrocamento, conforme se segue:

Critério de filtragem: $$\boldsymbol{D_{15,F}}\Big/\boldsymbol{D_{85,B}} \leq \mathbf{9}$$ Equação 4

Critério de permeabilidade: $$\boldsymbol{D_{15,F}}\Big/\boldsymbol{D_{15,B}} \geq \mathbf{5}$$ Equação 5

[9] apresentam um método para dimensionamento de filtros granulares baseado na classificação granulométrica do solo protegido e na definição de critérios de retenção e permeabilidade para os materiais filtrantes. A metodologia foi desenvolvida a partir de extensivos estudos experimentais conduzidos pelo Soil Conservation Service (SCS) entre 1980 e 1985 e estabelece procedimentos para definição das faixas granulométricas admissíveis dos filtros em função das características do material-base. Além dos critérios de filtragem e permeabilidade, o método incorpora verificações relacionadas à uniformidade e ao potencial de segregação dos materiais, visando garantir o desempenho hidráulico e geotécnico do sistema drenante.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi elaborado com base no referencial teórico apresentado anteriormente, a partir do qual se estruturou o procedimento metodológico adotado, conforme sintetizado no fluxograma apresentado na Figura 1.

Embora a literatura apresente outros métodos para o dimensionamento de filtros granulares, como o procedimento proposto [9], o estudo concentrou-se na aplicação dos critérios de [3], [4] e [5], por serem amplamente difundidos na prática de projeto de barragens no Brasil e por apresentarem aplicabilidade direta às condições avaliadas.

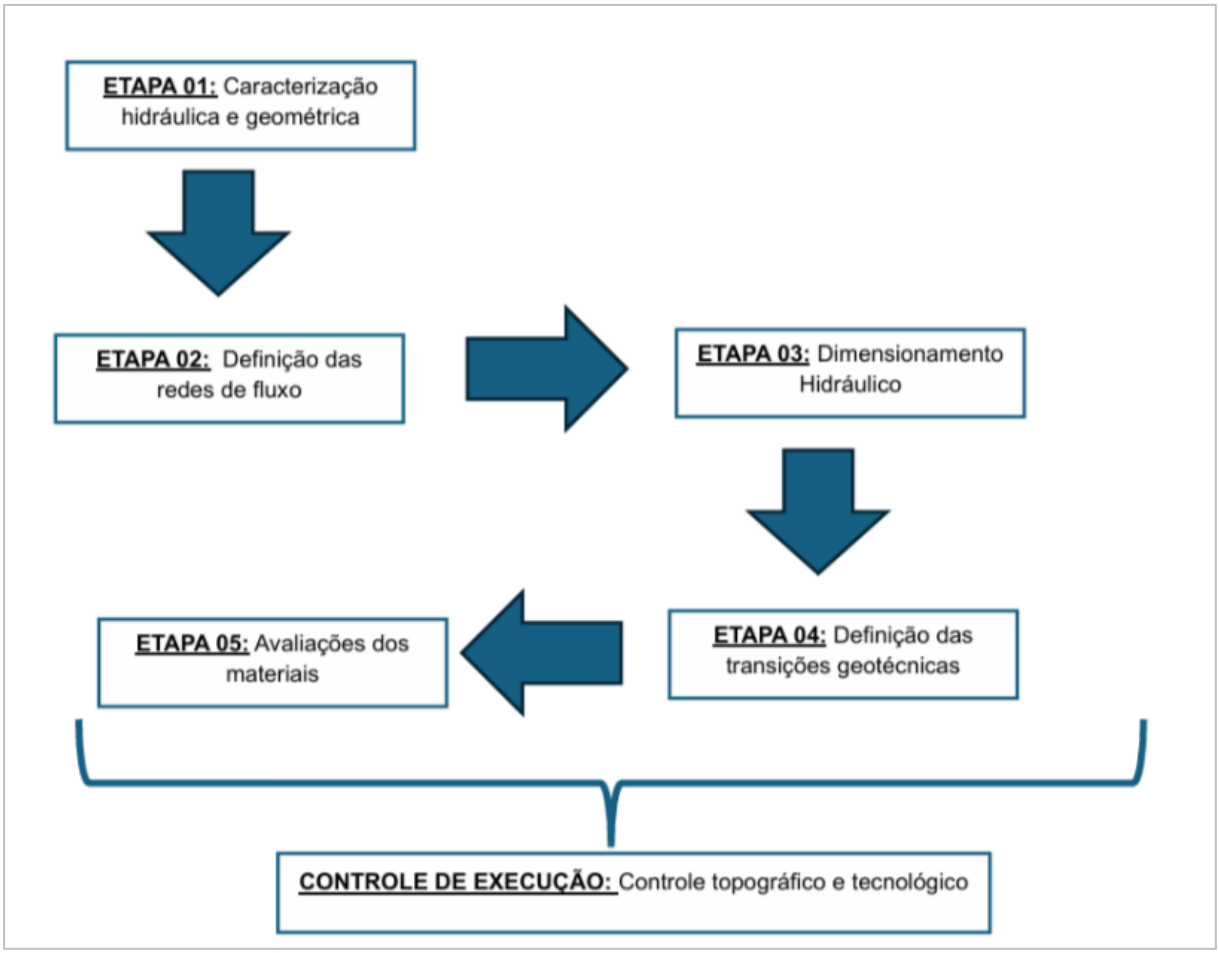


Figura 1 – Fluxograma para definição dos materiais e métodos.

A seguir é apresentado um detalhamento de cada etapa apresentada.

Etapa 1: Inicialmente, procedeu-se à caracterização da condutividade hidráulica dos materiais do maciço e da fundação, com base em resultados de ensaios geotécnicos e parâmetros adotados em projeto. O regime operacional do reservatório foi definido considerando a carga hidráulica operacional atuante no talude de montante, conforme definido nos estudos hidrológicos e hidráulicos, adotando-se condição de fluxo em regime permanente.

A definição da geometria do modelo considerou explicitamente a topografia do vale e a configuração do barramento, reconhecendo-se sua influência direta sobre a rede de fluxo, os gradientes hidráulicos e o posicionamento da linha freática no interior do maciço. Dessa forma, a topografia foi incorporada como elemento fundamental na representação das condições de percolação.

Etapa 2: A estimativa das vazões afluentes aos dispositivos de drenagem interna foi realizada por meio de análise de percolação bidimensional, utilizando-se modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos. Para a definição da rede de fluxo, foram introduzidas no modelo condições de contorno compatíveis com o cenário de operação do reservatório, destacando-se:

- condição de contorno de entrada associada ao nível d'água operacional do reservatório;
- condições de contorno de saída compatíveis com o dreno vertical, o tapete drenante e o pé do talude de jusante.

A partir da simulação do desenvolvimento da linha freática no interior do maciço, foram estimadas as vazões de entrada nos dispositivos de drenagem interna a serem dimensionados. Sobre os valores obtidos, aplicou-se fator de segurança, em consonância com práticas consagradas de projeto recomendadas na literatura técnica.

Etapa 03: Com base nas vazões estimadas, procedeu-se ao dimensionamento hidráulico dos dispositivos de drenagem interna, considerando-se a Lei de Darcy e os gradientes hidráulicos admissíveis, com o objetivo de definir as espessuras mínimas do dreno vertical e do tapete drenante horizontal, garantindo a condução adequada do fluxo percolado e o controle das pressões neutras no maciço.

Etapa 04: Paralelamente, realizou-se a caracterização granulométrica dos materiais do maciço e da fundação, com o objetivo de definir a envoltória granulométrica dos materiais-base em contato com o sistema de drenagem interna. Para a Transição 1, consideraram-se tanto o aterro compactado quanto os materiais de fundação representados por solo residual, de modo a contemplar a contribuição de fluxo proveniente da fundação, especialmente no caso do tapete drenante. A seleção dos materiais filtrantes e drenantes foi conduzida mediante a aplicação de critérios de:

- Retenção (filtragem);
- Permeabilidade.

Etapa 05: Os materiais disponíveis foram então avaliados quanto à sua compatibilidade com os intervalos granulométricos definidos.

Por fim, destaca-se que o método adotado pressupõe rigoroso controle de execução, tanto do ponto de vista topográfico quanto tecnológico, de forma a assegurar que as condições de contorno e as hipóteses consideradas na fase de dimensionamento sejam efetivamente atendidas durante a construção da barragem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados do dimensionamento do sistema de drenagem interna da Barragem X. As vazões de percolação foram obtidas por modelagem numérica em *software* específico e utilizadas como dados de entrada para a verificação hidráulica do filtro vertical e do tapete drenante.

Na sequência, foram avaliadas as transições geotécnicas entre os materiais do sistema drenante, com aplicação do Critério de Fell [5], do Critério de Terzaghi [3] e do Critério de Cruz [4]. A análise buscou verificar a compatibilidade granulométrica entre o solo de base, os materiais filtrantes, drenantes e o enrocamento, considerando critérios de retenção, permeabilidade e CNU.

4.1 Dimensionamento do Sistema de Drenagem Interna

Para a verificação hidráulica dos dispositivos de drenagem interna da Barragem X, adotou-se a Lei de *Darcy* (Equação 6), válida para fluxo laminar em regime permanente. As vazões unitárias utilizadas no dimensionamento foram obtidas a partir da análise de percolação bidimensional realizada a partir do método dos elementos finitos, considerando a geometria de uma seção hipotética "Seção A-A" e as condições de contorno definidas para o modelo.

Destaca-se que a estrutura em questão é prevista em região de vale razoavelmente encaixado, com comprimento de crista igual a 70,00 m. O sistema de drenagem interna foi previsto 2,00 m abaixo da cota da crista do barramento, com largura longitudinal do filtro vertical igual a 62,00 m (pouco inferior à largura da crista do barramento), tendo em vista a característica já citada. Outro ponto importante é a largura da saída, sendo prevista uma largura de 14,00 m na região do pé do barramento para a saída do fluxo do sistema de drenagem interna, como apresentado nos itens subsequentes.

Como evidenciado na Equação 6 e na Equação 7, tais informações são extremamente relevantes para o dimensionamento dos dispositivos, uma vez que a largura do filtro interfere na vazão calculada e a largura da saída do tapete drenante interfere diretamente no dimensionamento deste dispositivo, pelo qual irá percolar a completude dos fluxos do barramento.

Os resultados da análise numérica permitiram determinar a distribuição de cargas hidráulicas, a posição da linha freática no maciço e as vazões interceptadas pelo filtro vertical e pelo tapete drenante. A Tabela 1 apresenta os valores extraídos usados para dimensionamento das espessuras mínimas dos dispositivos drenantes.

Tabela 1 - Vazões unitárias obtidas nas análises de fluxo.

Seção	Vazão Unitária no Filtro Vertical (m³/s/m)	Vazão Unitária no Tapete Drenante (m³/s/m)
A-A'	2,8E-08	3,10E-08

4.2 Filtro Septo Vertical

Para o filtro vertical, a verificação foi realizada considerando faixas longitudinais de 1,00 m e gradiente hidráulico unitário, igual a 1,00 m/m. Essa hipótese é considerada conservadora e usual para filtros verticais, uma vez que a perda de carga pode ser aproximada ao comprimento do caminho de percolação na direção do fluxo.

A espessura mínima do filtro vertical foi estimada pela Lei de Darcy, conforme Equação 6. E o resultado da espessura mínima são apresentados na Tabela 2

$$e_{min} = {}^{q}/_{k.i} \qquad \text{Equação 6}$$

Em que:

e_{min}= espessura mínima do filtro vertical em m;

q= vazão unitária no filtro vertical, igual a 2,8E-08 m³/s/m;

k= condutividade hidráulica do material filtrante, igual a 1,00E-04 m/s, conforme Cruz (2004);

i= gradiente hidráulico adotado, igual a 1,00 m/m.

A Tabela 2 , apresenta o resultado obtido dá espessura mínima calculada para o filtro vertical.

Tabela 2 - Verificação do filtro septo vertical.

Seção	Vazão Unitária no Filtro Vertical (m³/s/m)	Espessura Mínima Calculada (cm)	Espessura Prevista (m)
A-A'	2,80E-08	0,03 cm	0,80 m

De acordo com o resultado apresentado na Tabela 2, para conduzir a vazão de percolação estimada no filtro vertical, seria necessária uma espessura mínima (e_{min}) de 0,03 cm. Entretanto, adotou-se uma espessura de 0,80 m, considerando a viabilidade de implantação da camada drenante, uma vez que a definição dessa espessura não deve se basear apenas na demanda hidráulica calculada, mas também em critérios construtivos e operacionais.

4.3 Tapete Drenante

O tapete drenante foi concebido para receber e conduzir as vazões provenientes do maciço e do filtro vertical até o dreno de pé. Para isso, foi adotada uma configuração do tipo "sanduíche", composta por núcleo em brita nº 0 envolvido por camadas de areia, de modo a garantir capacidade de condução hidráulica e proteção contra o carreamento de partículas.

A vazão total afluente ao tapete foi obtida pela soma das vazões unitárias captadas pelo filtro vertical e pelo próprio tapete, multiplicada pela largura de entrada da seção analisada, conforme Equação 7.

$$\boldsymbol{Q = L_{ENT}^{CENT.} \, x \, (q_{FILTRO}^{CENT.} + q_{TAPETE}^{CENT.})} \qquad \text{Equação 7}$$

Em que:

$Q =$ vazão total afluente ao sistema de drenagem interna, em m³/s;
$L_{ENT} =$ largura de entrada considerada, igual a 62,00 m;
q_{FILTRO} *= vazão unitária captada pelo filtro vertical, igual a 2,80E-08 m³/s/m;*
q_{TAPETE} = vazão unitária captada pelo tapete drenante, igual a 3,10E-08 m³/s/m.

A Tabela 3 apresenta o resultado obtido para a vazão total (*Q*).

Tabela 3 - Verificação do tapete drenante.

Seção	Vazão Unitária no Filtro Vertical (m³/s/m)	Vazão Unitária no Tapete Drenante (m³/s/m)	Largura de Entrada (m)	Vazão (m³/s)
A-A'	2,80E-08	3,10E-08	62,00	3,66E-06

A vazão total obtida (Q) foi de 3,66E-06 m³/s. Para incorporar incertezas associadas à permeabilidade, às condições de contorno do modelo e à variabilidade construtiva, adotou-se fator de segurança hidráulico igual a 10, resultando em vazão de cálculo (Q_{c}) de 3,66E-05 m³/s.

Para a obtenção da espessura mínima do tapete drenante, aplicou-se novamente a Lei de Darcy, considerando a vazão de cálculo, a condutividade hidráulica da brita nº

0, o gradiente hidráulico representativo do trecho de saída e a largura de saída do tapete. A relação utilizada é apresentada na Equação 8.

$$e_{min} = {Qc}/{k.\,i.\,L_{SAIDA}} \qquad \text{Equação 8}$$

Em que:

e_{min}= espessura mínima do núcleo drenante, em m;
Q_c= vazão de cálculo da drenagem interna, igual a 3,66E-05 m³/s;
k= condutividade hidráulica da brita nº 0, igual a 1,00E-03 m/s, conforme Cruz (2009);
i= gradiente hidráulico no trecho de saída, igual a 0,02 m/m;
$L_{SAÍDA}$= largura de saída do tapete drenante, igual a 14,00 m.

A espessura mínima calculada (e_{min}) foi de 0,13 m. Entretanto, adotou-se núcleo em brita nº 0 com 0,30 m, envolvido por duas camadas de areia de 0,30 m, totalizando 0,90 m. Assim como no filtro vertical, a espessura adotada atende não apenas à demanda hidráulica, mas também às condições mínimas de execução e controle da obra.

4.4 Dimensionamento das Transições Geotécnicas – Critério de Fell [5]

Após o dimensionamento hidráulico, foram avaliadas as transições geotécnicas entre os materiais do sistema drenante. Essa etapa teve como objetivo verificar a compatibilidade granulométrica entre materiais adjacentes, prevenindo o carreamento de partículas e a colmatação do sistema de drenagem interna.

A partir das etapas metodológicas previstas no item 3, a Transição 1 foi avaliada considerando a envoltória granulométrica dos materiais-base em contato com o sistema de drenagem interna, incluindo o aterro compactado e os materiais de fundação representados por solo residual/saprolito. Essa abordagem permite contemplar não apenas o fluxo proveniente do maciço compactado, mas também a contribuição da fundação para o tapete drenante.

Para as transições, foram consideradas as faixas granulométricas da areia, brita nº 0 e brita nº 3, conforme limites da norma [7], por serem materiais usualmente empregados em drenagens internas de barragens de terra.

Inicialmente, avaliou-se a compatibilidade entre o solo base e o primeiro material de transição. Em seguida, cada material definido como transição passou a ser considerado como novo solo base para a verificação da camada subsequente. Os resultados das transições 1, 2, 3 e 4 são apresentados entre a Figura 2 e a Figura 5.

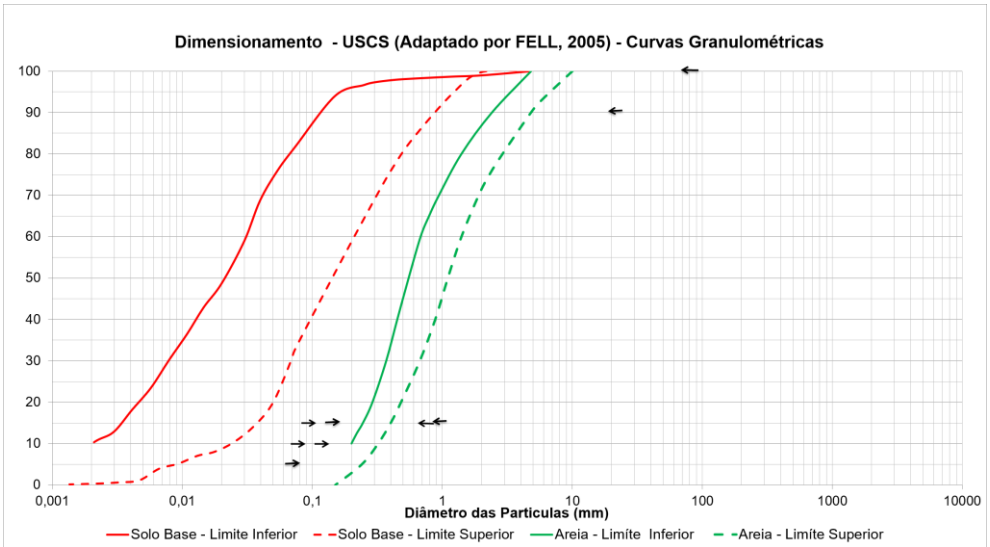


Figura 2 – Transição 1 pelo Critério de [5]

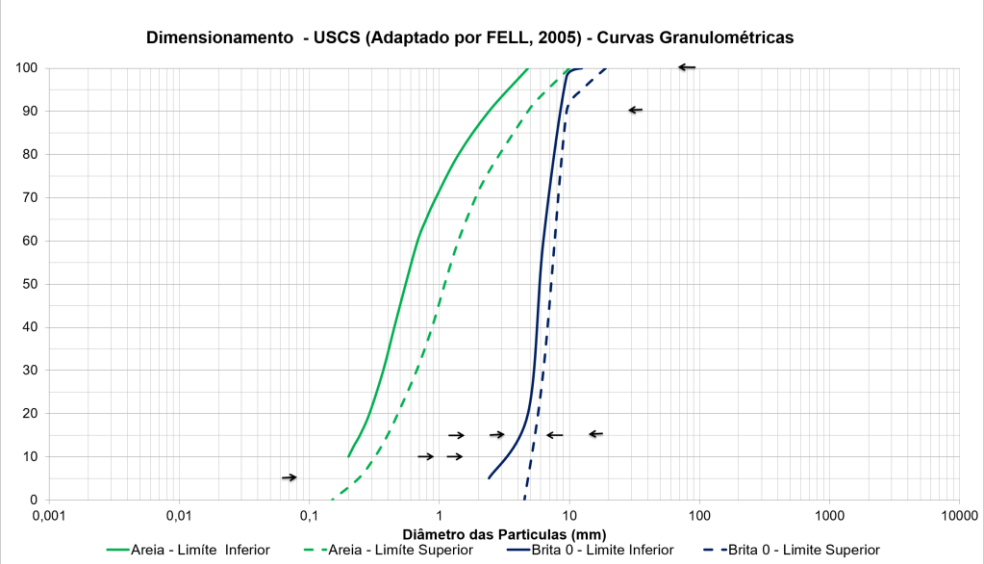


Figura 3 –Transição 2 pelo Critério de [5]

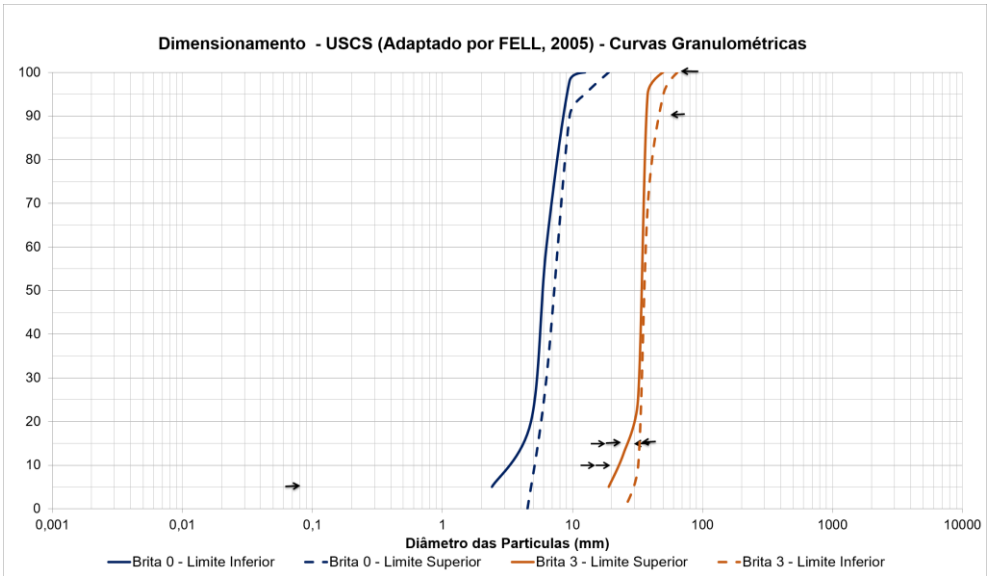


Figura 4 –Transição 3 pelo Critério de [5]

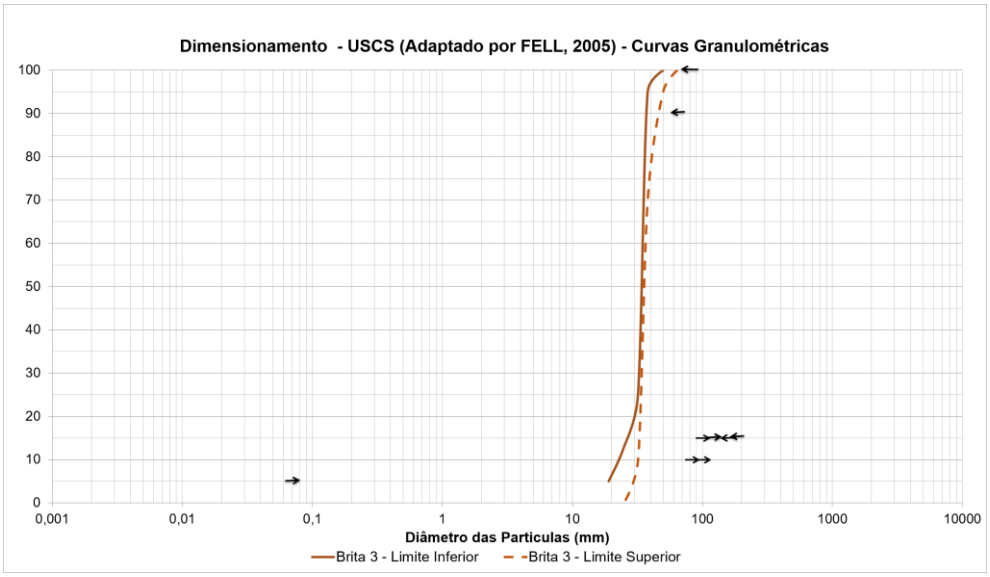


Figura 5 –Transição 4 pelo Critério de [5]

As Transições 1, 2 e 3 apresentaram compatibilidade satisfatória pelo Critério de [5], permitindo a evolução granulométrica entre os materiais adotados. Entretanto, para a Transição 4, associada à passagem da brita nº 3 para o enrocamento do dreno de pé, o método apresentou limitação. Os limites superiores calculados ficaram muito restritos e, portanto, não permitindo uma transição adequada para o material mais grosseiro.

Essa limitação está relacionada aos próprios limites máximos previstos pela metodologia para os diâmetros característicos do material filtrante, como $D_{90FMÁX}$ $D_{100FMÁX}$, podendo atingir, respectivamente, 75 mm e 60 mm. Dessa forma, para materiais de granulometria mais grossa, como o enrocamento, o critério de [5] não se mostrou satisfatório no caso estudado, sendo necessária a adoção de uma metodologia complementar mais compatível com essa faixa granulométrica.

Diante disso, para a Transição 4, adotou-se o Critério de [4], conforme Figura 6.

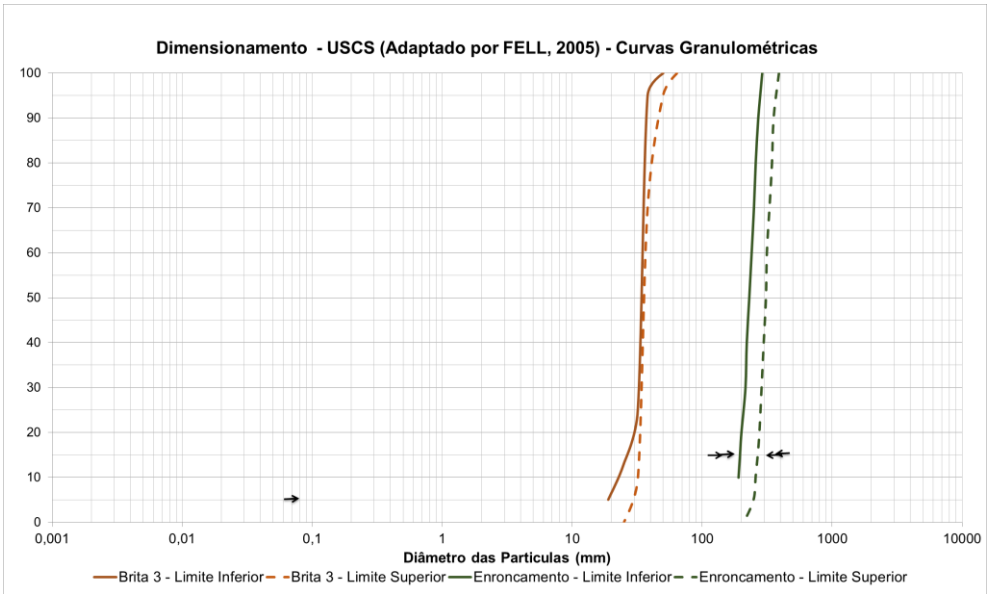


Figura 6 –Transição 4 pelo Critério de [4]

A aplicação do critério de [4] permitiu estabelecer uma faixa granulométrica de transição da brita nº 3 para o enrocamento, mostrando-se mais adequada para a Transição 4. As curvas granulométricas finais dos materiais definidos são apresentadas na Figura 7 e na Tabela 4.

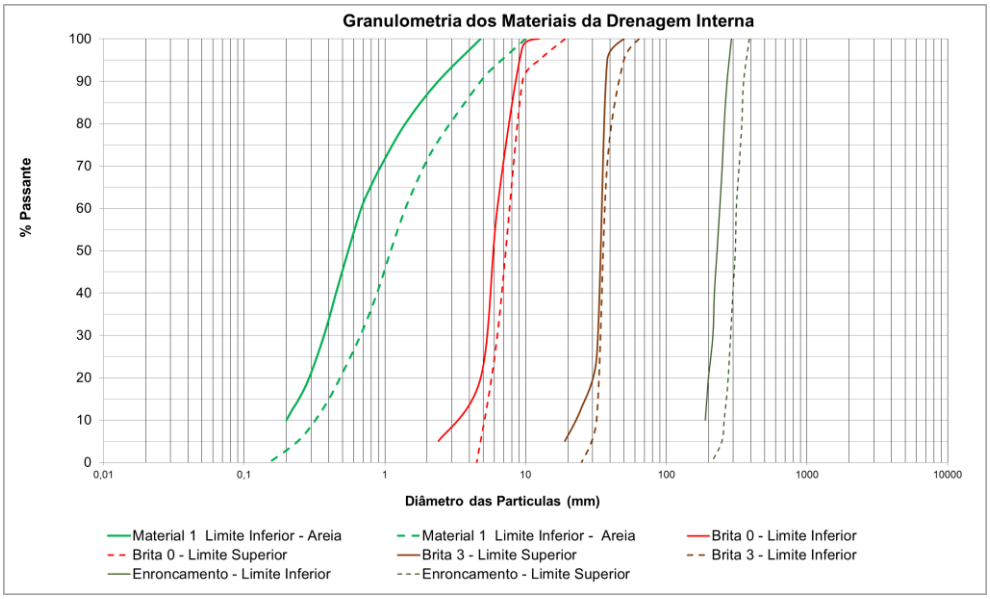


Figura 7 – Curvas granulométricas definidas para as transições geotécnicas – Critério de [5] e [4].

Tabela 4 - Diâmetros referentes às porcentagens passantes dos materiais definidos para as transições geotécnicas – Critério de [5].

Material	**Material 1 - Areia**		**Material 2- Brita 0**		**Material 3 - Brita 3**		**Material 4 - Enrocamento D50 = 250mm**	
% Passante	**mm**		**mm**		**mm**		**mm**	
	Limite Inferior	**Limite Superior**	**Limite Inferior**	**Limite Superior**	**Limite Inferior**	**Limite Superior**	**Limite Inferior**	**Limite Superior**
100	4,80	10,00	12,50	19,00	50,00	64,00	290,00	390,00
90	2,40	4,80	8,60	9,50	37,00	46,20	270,00	355,00

Material	Material 1 - Areia		Material 2- Brita 0		Material 3 - Brita 3		Material 4 - Enrocamento D50 = 250mm	
% Passante	mm		mm		mm		mm	
	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior
80	1,40	2,90	7,70	8,80	36,00	41,00	258,00	345,00
70	0,94	1,90	6,90	8,10	35,00	38,00	250,00	330,00
60	0,68	1,40	6,30	7,60	34,60	36,50	240,00	315,00
50	0,55	1,10	5,90	7,20	34,00	35,50	230,00	310,00
40	0,45	0,88	5,60	6,80	33,40	34,70	220,00	298,00
30	0,37	0,67	5,30	6,30	32,60	34,30	215,00	287,00
20	0,29	0,48	4,80	5,80	30,50	33,50	200,00	276,00
15	0,25	0,40	4,20	5,50	26,50	33,10	195,00	268,00
10	0,20	0,32	3,36	5,15	23,30	32,00	190,00	258,00
CNU	**3,40**	**4,38**	**1,88**	**1,48**	**1,48**	**1,14**	**1,26**	**1,22**

Além das faixas granulométricas, foram avaliados os coeficientes CNU<6 que permitiu verificar o grau de uniformidade das curvas. De modo geral, foram satisfatórios indicando materiais predominantemente uniformes.

4.5 Dimensionamento das Transições Geotécnicas – Critério de Terzaghi [3]

Também foi aplicado o Critério de [3], conforme metodologia indicada no Item 3, com o objetivo de comparar seus resultados com aqueles obtidos pelo Critério de Fell e avaliar as implicações práticas de cada metodologia na seleção dos materiais. A Figura 8 apresenta a Transição 1 pelo Critério [3].

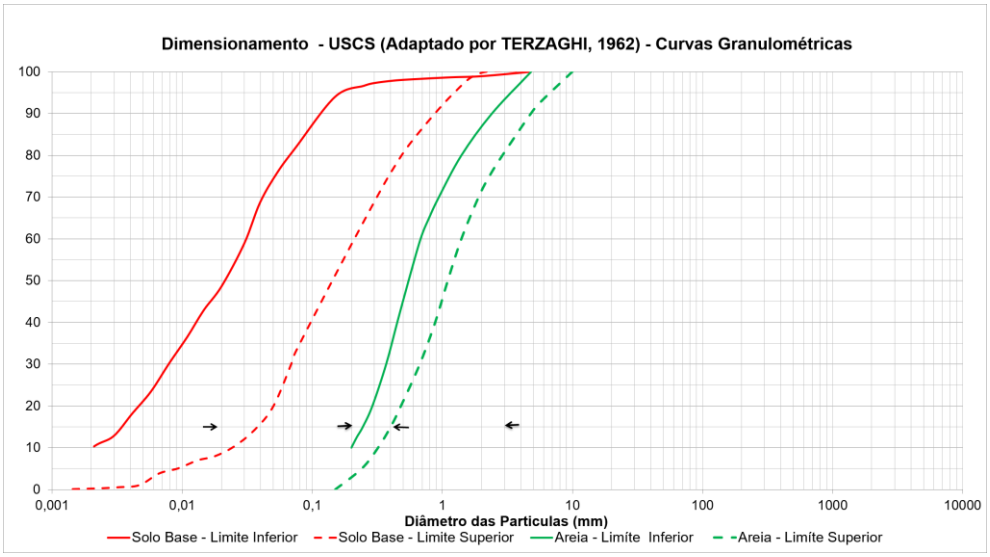


Figura 8 –Transição 1 pelo Critério de [3].

Na Transição 1, o Critério de [3] resultou em uma faixa relativamente ampla de materiais admissíveis. Essa característica facilita a seleção de materiais, mas exige interpretação técnica, pois materiais com granulometrias distintas podem atender aos

limites do método sem necessariamente representar a solução mais adequada ao projeto.

Para manter a comparação entre os métodos e preservar a coerência com materiais usualmente empregados em drenagem interna, manteve-se como referência a faixa granulométrica da areia definida pela [7].

A Figura 9 apresenta a Transição 2 pelo critério de [3].

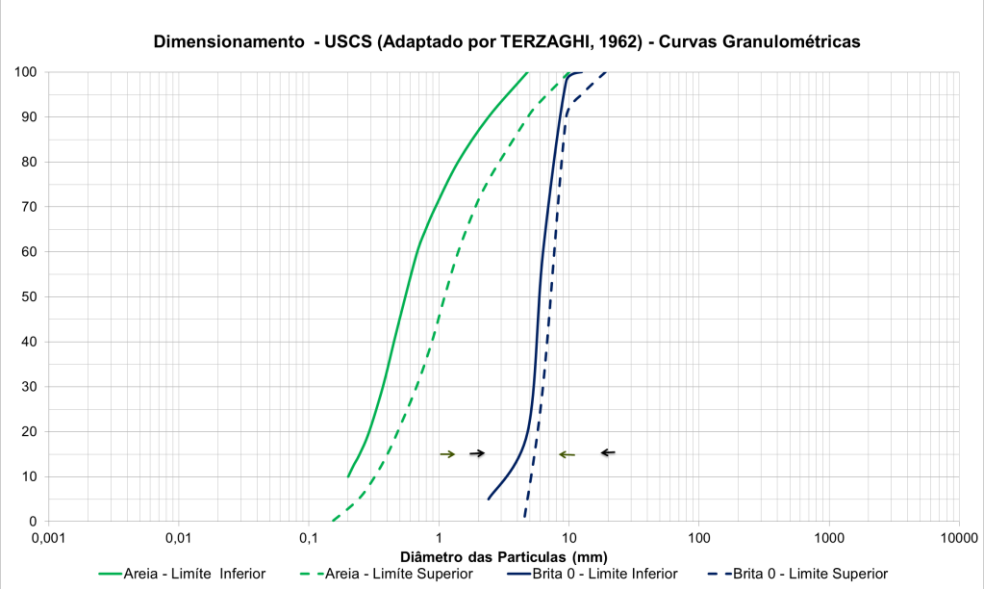


Figura 9 –Transição 2 pelo Critério de [3].

Na Transição 2, a brita nº 0 apresentou compatibilidade com a areia, atendendo aos limites de retenção e permeabilidade estabelecidos pelo Critério de [3]. Dessa forma, o material foi considerado adequado para compor a segunda transição.

A Figura 10 apresenta a Transição 3 pelo Critério de [3].

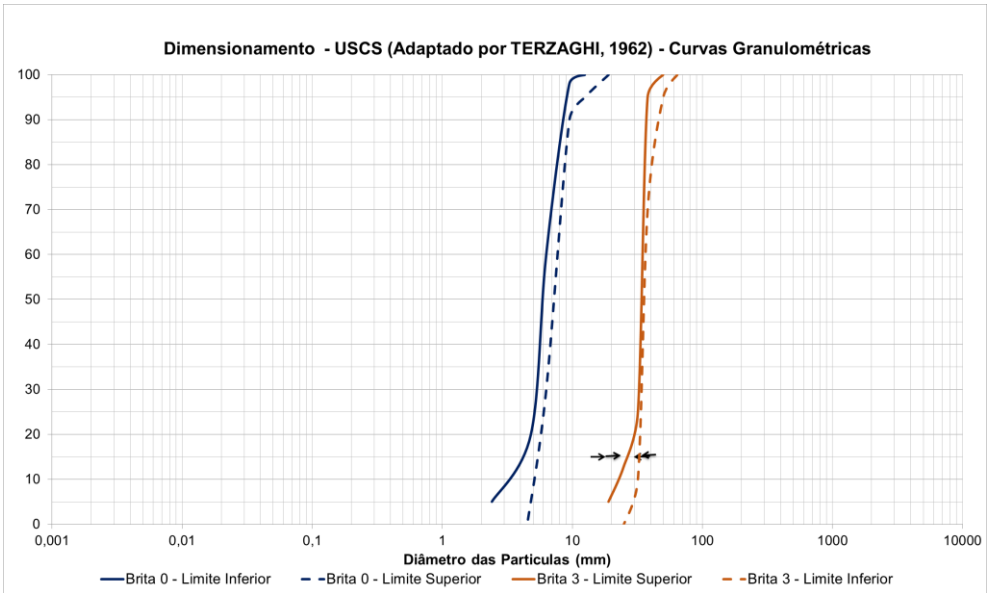


Figura 10 –Transição 3 pelo Critério de [3]

Na Transição 3, a brita nº 3 também se mostrou compatível com a brita nº 0, permitindo a continuidade granulométrica do sistema. O Critério de [3] apresentou resultado tecnicamente aplicável para essa transição.

A Figura 11 apresenta a Transição 4 pelo Critério de [3].

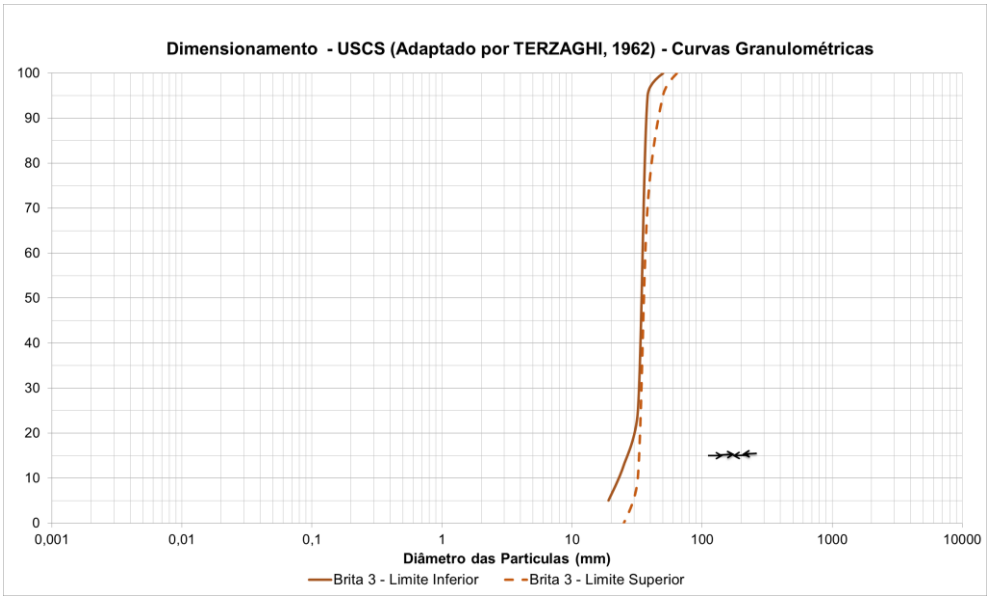


Figura 11 –Transição 4 pelo Critério de [3]

Na Transição 4, entretanto, o Critério de [3] resultou em limites muito restritos, dificultando a compatibilização com o enrocamento. Assim como observado no Critério de [5], a aplicação do método para materiais muito grosseiros mostrou-se limitada. Por esse motivo, adotou-se novamente o Critério de [4] para a transição final, por apresentar melhor transição à granulometria do enrocamento.

Assim, a solução adotada para a Transição 4 (Figura 6) pelo Critério de [4] também se aplica à avaliação pelo Critério de [3], uma vez que ambos os métodos partiram da mesma faixa granulométrica da brita nº 3, definida conforme a norma [7], para a transição com o enrocamento.

Por fim, verificou-se que as mesmas faixas granulométricas adotadas com base no Critério de [5] também atenderam aos limites estabelecidos pelo Critério de [3] para as transições geotécnicas avaliadas, uma vez que as faixas granulométricas selecionadas atenderam simultaneamente aos limites estabelecidos por ambas as metodologias. A Figura 7 e na Tabela 4 apresentam as faixas granulométricas selecionadas.

4.6 Comparação entre metodologias e implicações para projeto

A comparação entre os critérios de Fell [5], Terzaghi [3] e Cruz [4] demonstra que o dimensionamento das transições geotécnicas exige interpretação técnica, não devendo ser conduzido de forma automática. Embora os métodos avaliados sejam reconhecidos, cada um apresentou particularidades que influenciaram diretamente a seleção dos materiais.

No dimensionamento hidráulico, as espessuras mínimas calculadas para o filtro vertical e para o tapete drenante foram inferiores às espessuras adotadas. Essa diferença se justifica por critérios de construtibilidade, controle executivo e operação, uma vez que a adoção das espessuras mínimas calculadas não seria adequada na prática.

Na avaliação granulométrica, as transições iniciais foram adequadamente atendidas pelo Critério de [5] e pelo Critério de [3]. A principal limitação ocorreu na Transição 4, da brita nº 3 para o enrocamento. Pelo Critério de [5], a faixa superior calculada não alcançou os diâmetros de enrocamento. Pelo Critério de [3], os limites foram muito restritivos. Assim, o Critério de [4] mostrou-se mais adequado para compatibilizar materiais granulares mais grosseiros.

Dessa forma, conclui-se que a escolha do método deve considerar não apenas as relações granulométricas, mas também a disponibilidade dos materiais, a função de cada camada, a construtibilidade e o controle tecnológico. Para a Barragem X, a adoção combinada dos critérios permitiu uma solução tecnicamente coerente, com desempenho hidráulico satisfatório e transições compatíveis com as condições do sistema drenante.

5. CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado, conclui-se que o dimensionamento da drenagem interna em barragens de terra deve integrar a verificação hidráulica dos dispositivos e a avaliação granulométrica dos materiais de transição.

As vazões obtidas pela modelagem numérica permitiram dimensionar o filtro vertical e o tapete drenante com base na Lei de Darcy. As espessuras mínimas calculadas foram inferiores às espessuras adotadas no estudo, indicando capacidade hidráulica suficiente para condução do fluxo percolado. Entretanto, a adoção das espessuras finais também considerou critérios construtivos, operacionais e controle executivo.

A avaliação das transições geotécnicas demonstrou que os Critérios de Fell [5] e Terzaghi [3] foram adequados para as transições iniciais entre solo base, areia, brita nº 0 e brita nº 3. Contudo, ambos apresentaram limitações na transição final com o enrocamento, sendo necessária a adoção do Critério de Cruz [4], que se mostrou mais compatível com materiais de granulometria mais grosseira.

Dessa forma, conclui-se que a escolha do método de dimensionamento das transições geotécnicas deve considerar não apenas o atendimento às relações granulométricas, mas também a disponibilidade dos materiais, a função de cada camada, a construtibilidade e os parâmetros granulométricos dos materiais adotados.

O estudo de caso realizado evidenciou que a combinação entre os critérios avaliados tem como potencial a definição de uma solução tecnicamente coerente e aderente com a realidade. Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a avaliação de outras metodologias de dimensionamento de filtros amplamente utilizadas na prática internacional, como os critérios propostos pelo [9], de modo a ampliar a comparação entre procedimentos de definição de filtros e transições geotécnicas.

6. PALAVRAS-CHAVE

Segurança de Barragens; Filtragem; Permeabilidade; Transições.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] XIAO, M.; BARRETO, D. (2015) – “Geotechnical Engineering Design”, John Wiley & Sons Inc., West Sussex, Reino Unido.

[2] HOBBS, B. E.; ORD, A. (2015) – “Structural Geology: The Mechanics of Deforming Metamorphic Rocks”, v. 1, Principles, Elsevier, Amsterdam/Oxford.

[3] TERZAGHI, K.; PECK, R. B. (1962) – “Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia”, 1. ed., tradução de A. J. da Costa Nunes e M. de L. C. Campello, Rio de Janeiro.

[4] CRUZ, P. T. (2004) – “100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto”, 2. ed.

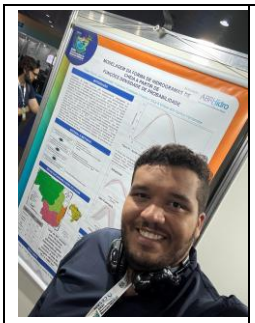
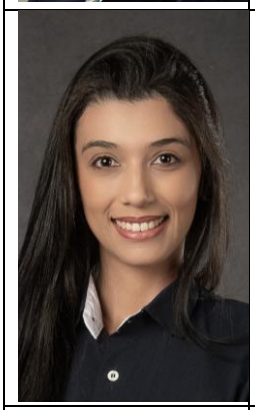
[5] FELL, R. et al. (2005) – “Geotechnical Engineering of Dams”, 2. ed., CRC Press, Londres, Reino Unido.

[6] DAVIS, C. V.; SORENSEN, K. E. (1974) – “Concrete Face Rockfill Dam”, In: STEEL, I. C.; COOKE, J. B. (eds.), Handbook of Applied Hydraulics, cap. 19, 3. ed., McGraw-Hill Book Company, Nova York, Estados Unidos.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2022) – “NBR 7211: Agregados para Concreto — Requisitos”, Rio de Janeiro, Brasil.

[8] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD (1998) – “ICOLD Guidelines on Risk Assessment for Dams”, In: WILLIAMS, A., ICOLD Chairman’s 1997/98 Progress Report for New Delhi Meeting, Information Letter, p. 1–28, Nova Délhi, Índia.

[9] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA (1994) – “Gradation Design of Sand and Gravel Filters”, National Engineering Handbook, Part 633 – Soil Engineering, Chapter 26, Soil Conservation Service, Washington, D.C., Estados Unidos.

	**Thales BASILIO** Engenheiro Civil (UFMG), com especialização em Engenharia de Barragens (PUC-MG) e Mestrado em Recursos Hídricos pela UFMG. Tem experiência em projeto de barragens de pequeno e médio porte, além de ter participado de dezenas de auditorias relacionadas a barragens dos mais diferentes portes e finalidades.
	**Ingrid VIANA** Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e pós-graduada em Engenharia de Barragens pela PUC Minas. Atua na área geotécnica, com experiência em projetos, análises de estabilidade e percolação, instrumentação, ensaios geotécnicos de campo e laboratório, governança geotécnica e gestão de riscos de estruturas geotécnicas.
	Aline ANDALICIO

	Especialista em Gestão de Projetos pela PUC Minas (2024). Mestra em Geotecnia pela Universidade Federal de Ouro Preto (2021). Possui graduação em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2017). Experiência consolidada no desenvolvimento de projetos de pilhas, avaliação de desempenho e segurança de estruturas geotécnicas, proposição de soluções para estabilização de taludes, bem como na elaboração de documentação técnica.
	**Samantha CASAZZA** Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto, pós-graduada em Segurança de Barragens pelo IDD. Atua em projetos geotécnicos aplicados à mineração. Desenvolve atividades relacionadas à sistematização de dados, análise de instrumentação geotécnica, interpretação de ensaios geotécnicos de campo e laboratório, análises de estabilidade e percolação e inspeções de estruturas.
	**Vitória QUEIROZ** Engenheira Urbana formada pela UFOP, com pós-graduação em Engenharia Geotécnica em andamento. Atua em geotecnia com foco no monitoramento e segurança de estruturas, com experiência em instrumentação geotécnica, inspeções de campo, análise de dados, *As Built*, projetos de descaracterização, interpretação de ensaios e elaboração de relatórios técnicos (EoR e RISR).

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.1
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MATERIAIS DRENANTES SOB EXPOSIÇÃO PROLONGADA AO EFLUENTE DO RESÍDUO DE BAUXITA

Adriano CIUFFI
Engenheiro de Projetos - Hydro Alunorte

Cássia GOMES
Engenheiro de Projetos - Hydro Alunorte

Darivan COSTA
Supervisor de Operação - Hydro Alunorte

João Wendell SANTOS
Coordenador de Projetos - Hydro Alunorte

Ronaldo PANTOJA

Coordenador de Geotecnia - Hydro Alunorte

RESUMO

O empilhamento drenado de resíduos tem se destacado como alternativa segura e eficiente às barragens convencionais. No entanto, esta transição demanda a reavaliação de dispositivos críticos, especialmente os sistemas de drenagem interna, responsáveis por controlar poropressões e disciplinar o fluxo de efluentes no interior do maciço. Apesar de amplamente utilizados, materiais granulares empregados em sistemas de drenagem interna podem sofrer alterações físicas quando expostos por longos períodos ao resíduo ou ao seu efluente, o que pode comprometer sua permeabilidade e favorecer processos de colmatação. Neste artigo apresenta-se a avaliação realizada para verificar se determinados materiais granulares tiveram suas propriedades físicas comprometidas, indicando uma suscetibilidade à colmatação, depois de expostos, por tempo prolongado, com o efluente do rejeito de bauxita. Durante o ensaio, adaptado do método USEPA 1314, os materiais foram submetidos a um fluxo constante, com duração de 151 a 163 dias. A comparação entre as propriedades físicas iniciais e finais permitiu identificar interações relevantes entre os materiais drenantes, o rejeito de bauxita e seu efluente, possibilitando a avaliação dos efeitos dessas interações sobre a permeabilidade ao longo do tempo. Os resultados obtidos indicaram que a exposição prolongada ao rejeito de bauxita não afetou de maneira significativa as propriedades físicas dos materiais sugerindo que esses são adequados para aplicação em sistemas de drenagem interna em estruturas de empilhamento drenado de rejeito de bauxita.

ABSTRACT

The dry stacking of tailings has emerged as a safe and efficient alternative to conventional dams. However, this transition requires the reassessment of critical components, particularly internal drainage systems, which are responsible for controlling pore pressures and regulating effluent flow within the structure. Although widely used, granular materials employed in internal drainage systems may undergo physical changes when exposed for extended periods to tailings or their effluents, which can compromise permeability and promote clogging processes. This study presents an evaluation conducted to verify whether specific granular materials experienced alterations in their physical properties, indicating susceptibility to clogging after prolonged exposure to bauxite tailings effluent. During the test, adapted from the USEPA 1314 method, the materials were subjected to a constant flow over an approximate duration of 130 days. The comparison between initial and final physical properties allowed for the identification of relevant interactions among the drainage materials, the bauxite tailings, and its effluent, enabling the assessment of the effects of these interactions on permeability over time. The results indicated that prolonged exposure to bauxite tailings did not significantly affect the physical properties of the materials, suggesting that they are suitable for use in internal drainage systems in drained stacking structures of bauxite tailings.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a disposição de rejeitos de mineração tem sido objeto de crescente atenção por parte da comunidade técnica, de órgãos reguladores e da sociedade, especialmente após eventos de ruptura com consequências ambientais e socioeconômicas significativas. Esse contexto tem impulsionado a busca por alternativas mais seguras às barragens convencionais, promovendo a adoção de tecnologias que reduzam os riscos associados à instabilidade geotécnica e à presença de grandes volumes de água armazenada [1].

Dentre essas alternativas, o empilhamento drenado de rejeitos (dry stacking) tem se destacado como uma solução tecnicamente viável e progressivamente adotada no setor mineral. Essa técnica baseia-se na disposição de rejeitos com baixos teores de umidade, permitindo a formação de estruturas predominantemente não saturadas, o que contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento, redução do potencial de liquefação e maior controle sobre o comportamento hidráulico do maciço [2]. Estudos recentes também indicam que o comportamento hidráulico e a estabilidade dessas estruturas estão fortemente associados às condições de compactação, à sucção matricial e ao controle de infiltração ao longo do tempo [3].

Apesar das vantagens associadas ao empilhamento drenado, o desempenho dessas estruturas depende de forma crítica da eficiência dos sistemas de drenagem interna. Tais sistemas desempenham papel fundamental no controle das poropressões e na condução adequada dos efluentes gerados, influenciando diretamente a estabilidade global da pilha. Nesse contexto, materiais granulares e dispositivos filtrantes são amplamente utilizados em elementos drenantes, tais como colchões drenantes, filtros e drenos internos, devido à sua elevada permeabilidade e capacidade de retenção de partículas finas.

Entretanto, o comportamento desses materiais ao longo do tempo, especialmente quando expostos de forma contínua aos rejeitos e seus efluentes, constitui um ponto de atenção relevante. A migração de partículas finas e a interação entre o fluido percolante e o meio poroso podem resultar na formação de camadas de baixa permeabilidade e na consequente redução da condutividade hidráulica, caracterizando processos de colmatação [4]. Estudos experimentais demonstram que a permeabilidade de materiais filtrantes pode apresentar redução significativa ao longo do tempo, frequentemente seguindo comportamento de decaimento em função do fluxo e da carga de finos transportada [4]. Além disso, o fenômeno de colmatação está associado a diferentes mecanismos físicos, incluindo obstrução de poros, formação de depósitos superficiais e crescimento de camadas filtrantes, os quais dependem tanto das características do material drenante quanto das propriedades do rejeito [5].

Embora existam estudos abordando mecanismos de filtração e colmatação em meios granulares, ainda são limitados os trabalhos que investigam o comportamento desses materiais sob exposição prolongada a efluentes específicos de rejeitos, em condições representativas de operação. Essa lacuna é particularmente relevante no caso de rejeitos de bauxita, cujas características físicas, químicas e mineralógicas podem variar significativamente em função do processo de beneficiamento e das condições de disposição, influenciando diretamente seu comportamento geotécnico e hidráulico [6,7]. Estudos recentes indicam ainda que o comportamento mecânico dos rejeitos de

bauxita é complexo e dependente do estado de tensões, estrutura interna do material e possíveis processos de alteração ao longo do tempo [8].

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a possível alteração das propriedades físicas de materiais granulares empregados em sistemas de drenagem interna, após exposição prolongada ao efluente de rejeito de bauxita. Para tanto, foi conduzido um ensaio de percolação de longa duração, baseado em metodologia adaptada do método USEPA 1314, o qual permite avaliar o comportamento de materiais granulares sob condições controladas de fluxo [9]. A comparação entre as propriedades iniciais e finais dos materiais possibilita verificar sua suscetibilidade à colmatação e avaliar a adequação desses materiais para aplicação em estruturas de empilhamento drenado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de avaliar os efeitos da interação, por tempo prolongado, do efluente do resíduo de bauxita com os materiais granulares, componentes do sistema de drenagem interna, desenvolveu-se um sistema de reprodução das condições em que esses materiais seriam expostos. Esses sistemas foram compostos por: um permeâmetro, dois reservatórios, sendo um para o efluente e um para o eluato, e uma bomba peristáltica. Cada permeâmetro foi montado com uma camada de brita 1 e outra de areia. Assim o efluente foi bombeado através do material granular (fluxo ascendente), disposto no interior do permeâmetro, e os efeitos desta interação foram avaliados em seguida.

2.1 Ensaio de Reprodução do Sistema

Esse sistema foi adaptado do USEPA 1314 [9], norma da agência de proteção ambiental dos Estados Unidos que padroniza o ensaio de percolação em coluna ("Up-Flow Percolation Column Procedure") utilizado para avaliar a lixiviação de constituintes inorgânicos e orgânicos não voláteis em materiais granulares em função da razão líquido/sólido (L/S). O fluido é percolado de baixo para cima através da amostra, permitindo avaliar a liberação de constituintes ao longo do tempo.

Na adaptação desenvolvida, o interesse não estava na mobilização química dos constituintes, mas sim na possível perda de desempenho hidráulico dos materiais drenantes decorrente da precipitação de sólidos ou transporte de finos pelo efluente do resíduo de bauxita.

Enquanto o método normativo utiliza solução de ensaio controlada, o estudo empregou o próprio efluente do resíduo de bauxita como agente percolante. Essa mudança permitiu reproduzir as interações físico-químicas que efetivamente ocorreriam em um sistema de drenagem interna de uma pilha de resíduo.

O estudo submeteu os materiais drenantes a um fluxo contínuo. O objetivo foi acelerar e reproduzir, em laboratório, fenômenos que poderiam ocorrer ao longo da vida operacional da estrutura de disposição de resíduos.

Na Figura 1 encontra-se uma visão geral dos três sistemas brevemente descritos.

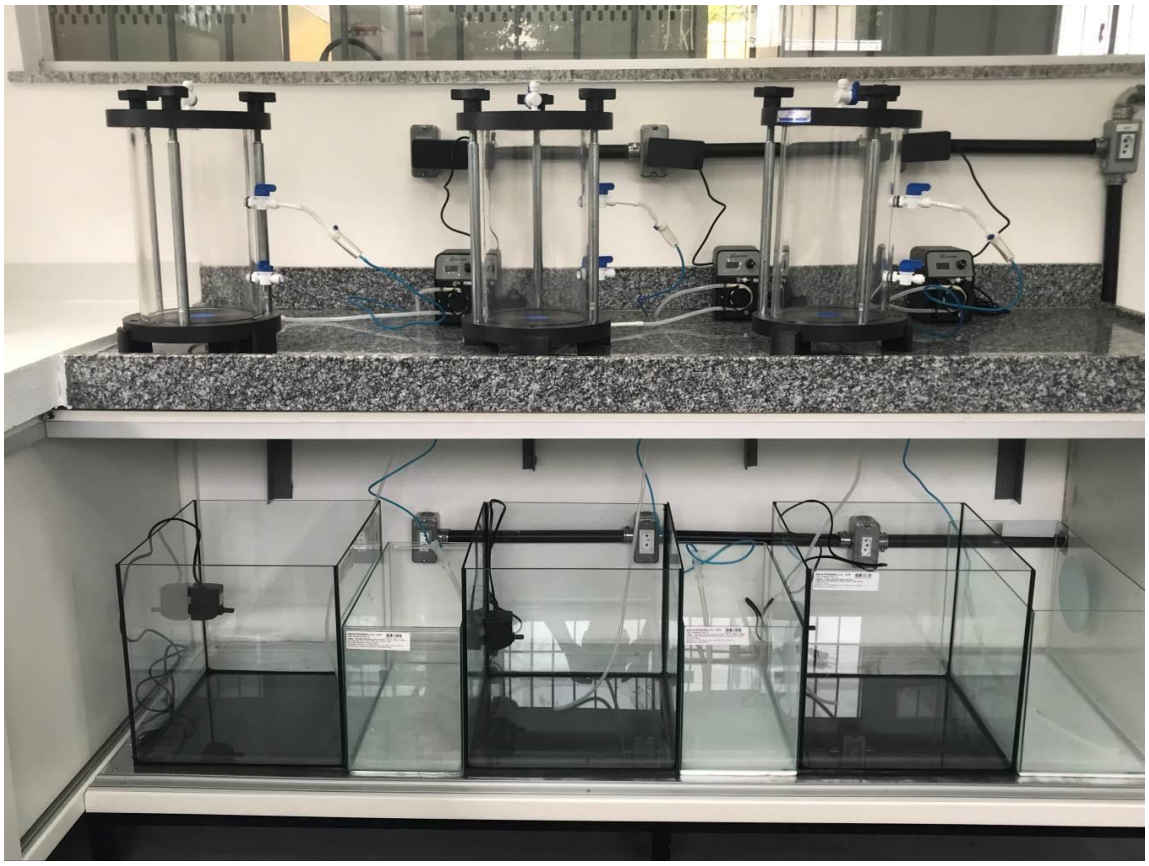


Figura 1 - Visão geral do aparato antes do ensaio de Reprodução do Sistema.

Abaixo explicaremos cada um desses componentes de forma detalhada:

2.1.1 Permeâmetro

Os permeâmetros eram constituídos por uma coluna de acrílico com 10mm de espessura, diâmetro e altura internos de 155 e 280mm, respectivamente. A coluna continha duas bases (inferior e superior) construída em polímero ABS, ambas com dispositivo para impedir o carreamento de finos para as tubulações e conexões de alimentação e saída. Foi também colocado lã de rocha sob o dispositivo para evitar o carreamento de finos. As tubulações eram de silicone e poliuréia e as conexões em PVC, tipo Luer (engate rápido). O permeâmetro possui entrada pela parte inferior, fluxo ascendente, e três válvulas de saída, conforme Figura 2.



Figura 2 - Permeâmetro



Figura 3 – Bomba peristáltica

2.1.2 Bomba Peristáltica

O sistema de bombeamento de cada modelo de reprodução do sistema de drenagem era constituído por uma bomba dosadora peristáltica (Figura 3) com vazão ajustável de 1ml a 120ml por minuto, intervalo que atendia a taxa exigida pelo método USEPA 1314 [9]. A bomba recalca o efluente para permeâmetro, visto que o recipiente se encontra abaixo da bomba (Figura 1).

2.1.3 Reservatórios

Cada modelo de reprodução do sistema de drenagem possuía dois reservatórios em vidro de 4mm de espessura. Um maior, com 45 litros, para armazenamento do efluente (Figura 4); e um menor, com 25 litros, para armazenamento do eluato (Figura 5). No reservatório maior foi acoplada uma bomba submersa de circulação para evitar a decantação da fração sólida do efluente durante todo o período de realização do ensaio.

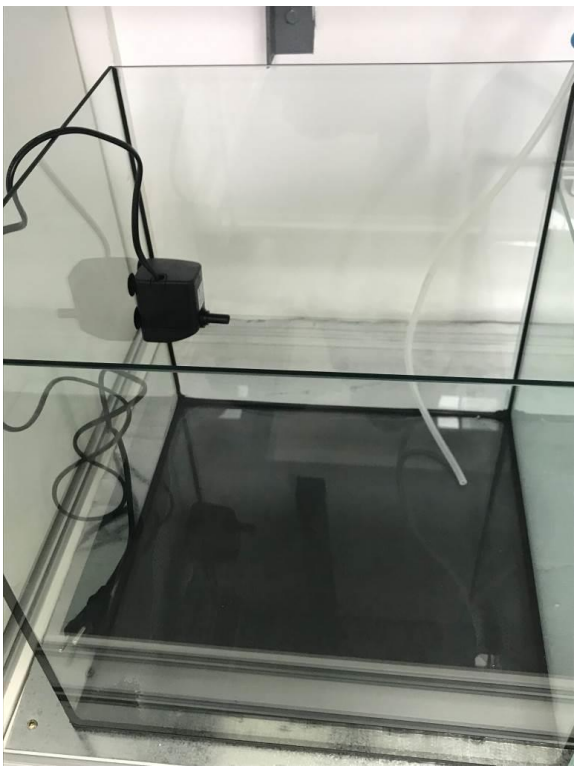


Figura 4 – Reservatório maior (efluente), com bomba submersa.



Figura 5 – Reservatório menor (eluato)

2.1.4 Montagem do Permeâmetro

A montagem do permeâmetro consistiu na inserção dos materiais granulares em seu interior. Neste processo, a granulometria da brita 1 foi selecionada de forma a atender a ABNT NBR 13292 [10] e a USEPA 1314 [9], de modo que foi necessário reduzir o diâmetro máximo das partículas da brita 1 de 19mm para 9,5mm. Para tanto, efetuou-se o peneiramento da brita na malha 9,5mm, empregando-se o material passante.

A areia foi colocada no interior dos permeâmetros saturada (umidade maior que 25%) em camada de 7cm, com vistas a seu adensamento (Figura 6). Após a expulsão da água pela válvula inferior (Figura 7) e pesagem do permeâmetro com a areia adensada, verificou-se a compacidade da areia (Figura 8). Em seguida, inseriu-se a brita 1 (Figura 9) compactando-a manualmente.

Os Permeâmetros 1 e 2 foram montados com duas camadas de lã-de-rocha nas extremidades, entre os materiais granulares, ou seja, antes da colocação da areia e depois da colocação da brita 1. O Permeâmetro 3 foi montado sem a camada de lã-de-rocha na porção inferior, em contato com a areia.

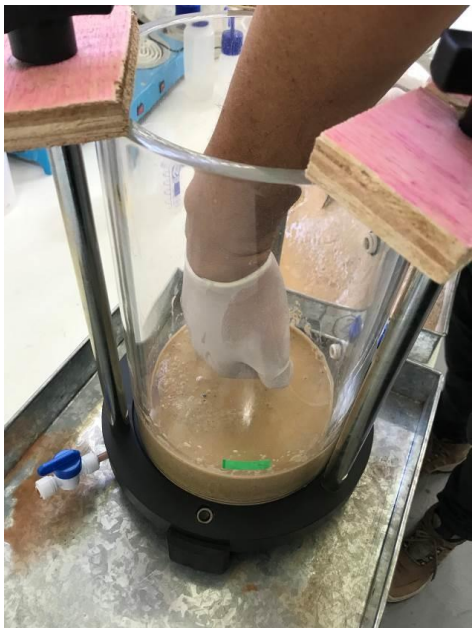


Figura 6 - Colocação da areia saturada no permeâmetro.



Figura 7 - Expulsão da água.



Figura 8 - Visão da camada de areia adensada.



Figura 9 - Pesagem final do permeâmetro montado.

Na Tabela 1 são mostradas as quantidades secas de material granular empregada em cada permeâmetro, a umidade e a compacidade da areia e a taxa de bombeamento do efluente adotada para os permeâmetros.

Tabela 1 - Dados dos Permeâmetros.

	Permeametro 1	Permeâmetro 2	Permeâmetro 3
Areia Seca (g)	2.463,1	2.500,9	2.374,5
Umidade da Areia (%)	15,63	14,51	14,95
Compacidade da Areia (%)	100	93,4	84,1
Brita 1 (g)	5.372,0	5.375,0	5.940,0
Massa Total material granular seco (g)	7.835,1	8.235,9	8.314,5
1,0 L/S (ml/min)	5,4	5,7	5,8
0,5 L/S (ml/min)	2,7	2,9	2,9

2.2 Caracterização dos materiais granulares

A fim de se avaliar os efeitos da exposição prolongada ao fluxo de efluente nas propriedades físicas dos materiais granulares, esses foram caracterizados anteriormente ao ensaio de Reprodução do Sistema. Abaixo é apresentada a caracterização:

2.2.1 Granulometria

A análise granulométrica foi realizada através do método de peneiramento, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7181:2018 [11]. As Figura 10 e Figura 11 mostram as curvas granulométricas da brita 1 ajustada e da areia, ambas dispostas nos permeâmetros antes da execução do ensaio USEPA 1314 adaptado, respectivamente.

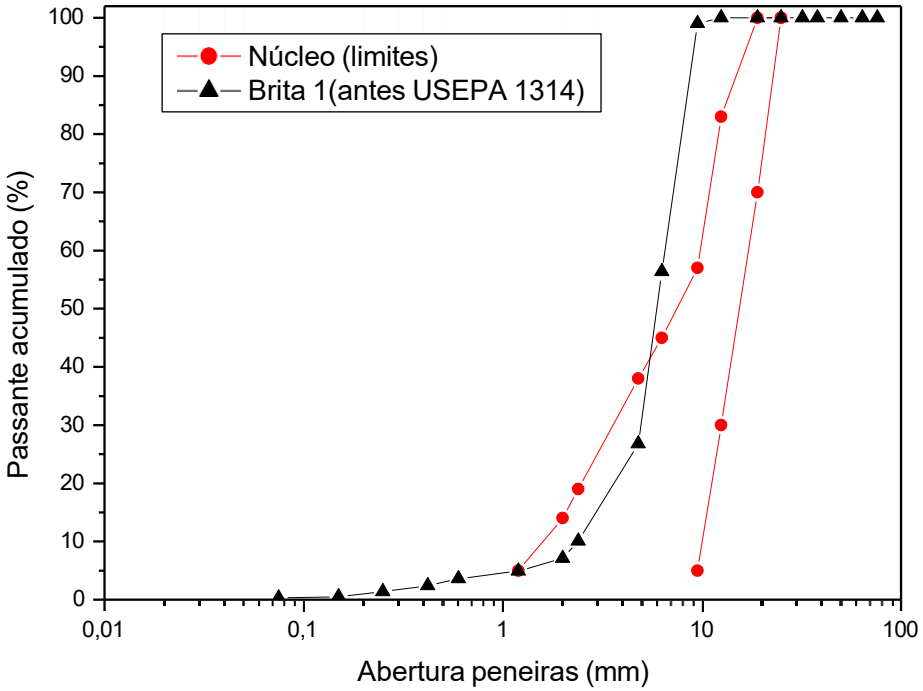


Figura 10 - Distribuição granulométrica da brita 1 ajustada.

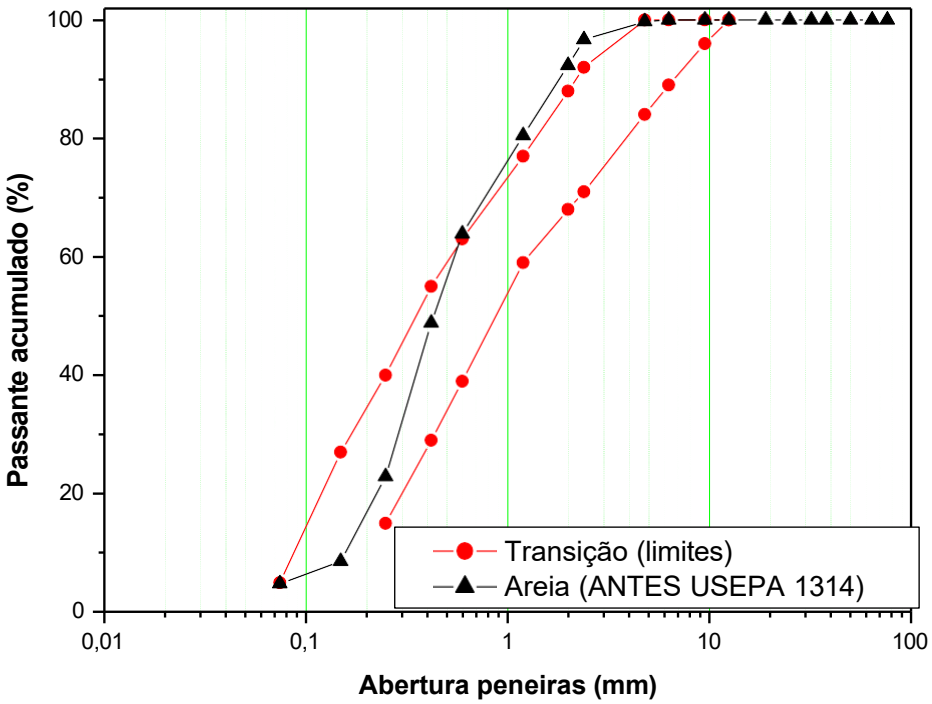


Figura 11 - Distribuição granulométrica da areia.

2.2.2 Coeficiente de Permeabilidade à Carga Constante

Os coeficientes de permeabilidade da brita 1 e da areia, todos à carga constante, foram determinadas de acordo com a norma ABNT NBR 13292 [12], corrigidos para temperatura de 20º C. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficiente de Permeabilidade à Carga Constante antes do ensaio de Reprodução do Sistema.

Material granular	K_{20} (cm.s^{-1})
Areia	1,73 x 10^{-3}
Brita 1	5,53

3. RESULTADOS

3.1 Condução do ensaio de Reprodução do Sistema

O ensaio fora iniciado após a completa saturação dos materiais granulares no interior dos pemeâmetros, processo que durou cerca de 7 horas. O tempo total de exposição ao fluxo ascendente de efluente foi de 163 dias para os Permeâmetros 1 e 2 e de 151 dias para o Permeâmetro 3. Aplicou-se uma vazão média de 5,6 mL/min. Para esta vazão, confirderando as dimensões do permeâmetro, calcula-se uma velocidade média de percolação de 5x10^{-6} m/s. Uma interessante demonstração do progresso do ensaio pode ser verificada nas figuras abaixo:



Figura 12 - Visão geral do aparato antes do ensaio de Reprodução do Sistema.



Figura 13 - Permeâmetro 2 - 2ª Semana



Figura 14 - Permeâmetro 2 - 8ª Semana



Figura 15 - Permeâmetro 2 - 13ª Semana

3.2. Granulometria

A análise granulométrica foi realizada através do método de peneiramento, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7181:2018 [11]. As Figura 16 e Figura 17 mostram a comparação das curvas granulométricas obtidas antes e depois do ensaio de Reprodução do Sistema, para a da brita 1 ajustada e para a areia, respectivamente.

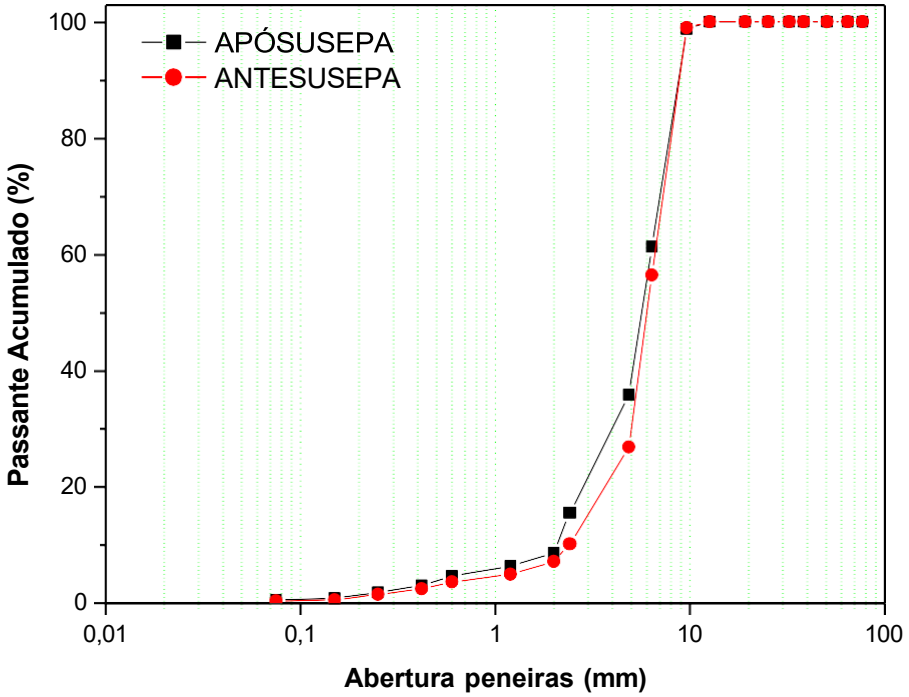


Figura 16 - Distribuição granulométrica comparativa da brita 1 ajustada, disposta no permeâmetro, antes e após execução do ensaio USEPA 1314.

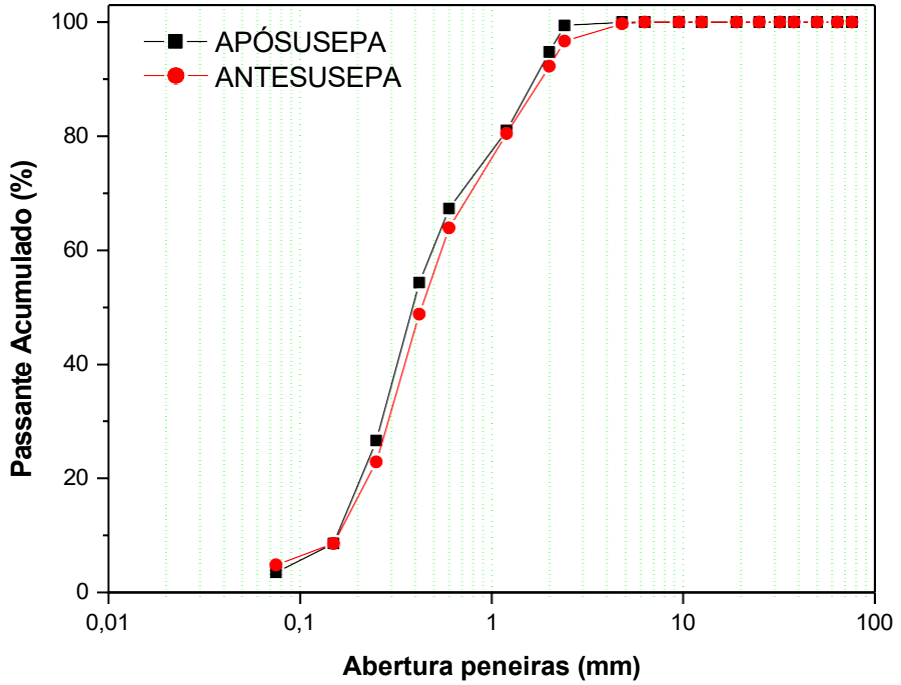


Figura 17 - Distribuição granulométrica comparativa da areia antes e após a execução do ensaio de Reprodução do Sistema.

3.3 Coeficiente de Permeabilidade à Carga Constante

Os coeficientes de permeabilidade da brita 1 e da areia, todos à carga constante, após o ensaio de Reprodução do Sistema, foram determinadas de acordo com a norma ABNT NBR 13292 [12], corrigidos para temperatura de 20º C. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 3 - Coeficiente de Permeabilidade à Carga Constante depois do ensaio de Reprodução do Sistema.

Material granular	K_{20} ($cm.s^{-1}$)
Areia	$9{,}28 \times 10^{-4}$
Brita 1	4,54

4. DISCUSSÕES

Na granulometria por peneiramento observa-se que não ocorreram alterações significativas na distribuição granulométrica da areia após fluxo contínuo de efluente por 150 dias. Inclusive, não houve diferenças significativas de percentuais de material passante na peneira 0,075mm entre as areias antes e após o ensaio de Reprodução do Sistema (4-5% de passante acumulado). Contudo, acredita-se que há diferenças entre o tipo de material fino, conforme foi constatado no ensaio de permeabilidade. Na areia antes do ensaio, os finos devem ser constituídos por siltes, ao passo que no material após o ensaio, os finos são predominantemente fração argila, proveniente do resíduo da bauxita, visto que esta fração não estava presente na areia antes do ensaio. Constatou-se uma contaminação intensa da fração sólida do efluente em locais específicos do permeâmetro, como nas paredes laterais do permeâmetro e na porção inferior, em contato com a lã-de-rocha.

Em condições de campo, a contaminação da areia ocorreria através de um fluxo unidirecional penetrando apenas em uma camada superficial de 3 a 4cm. A baixa penetração do efluente na camada superficial da areia irá ser função das condições de adensamento. No caso específico, o Grau de Compacidade da areia para os 3 permeâmetros ficou entre 85 e 99%.

Com relação a areia após o ensaio de Reprodução do Sistema, os resultados de coeficiente de permeabilidade encontrados estão sujeitos a uma imprecisão maior devido ao fato da deposição de partículas finas do resíduo da bauxita, o que reduziu substancialmente a permeabilidade. Parte-se da hipótese que os finos presentes na areia após o ensaio sejam na sua grande maioria de partículas do resíduo da bauxita, o que alterou a permeabilidade do material.

Apesar de o tempo de duração do ensaio ser inferior ao período de operação esperado para o sistema drenante em campo, a representatividade da metodologia está associada à exposição hidráulica acumulada imposta aos materiais. Cada permeâmetro recebeu aproximadamente 81 L de efluente para uma massa seca de aproximadamente 8 kg de material granular, atingindo razão L/S igual a 10. Assim, os materiais foram submetidos a uma elevada massa de efluente por unidade de massa sólida, condição suficiente para promover os principais processos de interação físico-química responsáveis por potenciais mecanismos de colmatação. Consequentemente, os resultados obtidos constituem uma avaliação representativa do comportamento dos materiais drenantes frente à exposição prolongada ao efluente do resíduo de bauxita.

5. CONCLUSÕES

- Os resultados indicaram que a exposição prolongada ao efluente do resíduo de bauxita não provocou alterações significativas nas propriedades físicas dos materiais avaliados. Dessa forma, os materiais granulares ensaiados demonstraram desempenho compatível com sua aplicação em sistemas de drenagem interna de estruturas de empilhamento drenado de resíduo de bauxita;
- A adaptação do ensaio USEPA 1314 [9], conforme descrito neste artigo se mostrou eficaz na simulação da condição real de um sistema de drenagem interna instalado no interior de uma pilha de resíduo;
- Os resultados obtidos foram satisfatórios para verificar a condição de permeabilidade dos materiais granulares ao final da vida útil da estrutura;
- Juntamente com um modelo numérico que simule a percolação no interior do maciço e as reais vazões que serão aplicadas no sistema será possível estimar o tempo necessário para colmatação do sistema;
- Ensaios de caracterização química e mineralógica nos materiais granulares antes e depois do ensaio de Reprodução do Sistema seriam úteis para verificar a alteração dos materiais de forma mais abrangente.

6. PALAVRAS-CHAVE

Empilhamento drenado, Materiais granulares, Colmatação, Rejeito de bauxita, Permeabilidade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD (2022) – “Tailings Dam Safety”, Congresso ICOLD, segurança de barragens de rejeitos, Bulletin 194, França.

[2] AMOAH, J. (2024) – “Filtered Tailings for Safe and Sustainable Mine Waste Management”, anais do International Seminar on Mine Waste, disposição de rejeitos, volume único, Canadá.

[3] DIAS NETO, J. et al. (2025) – “Hydro-Mechanical Behaviour of Filtered Tailings Stacks”, anais do Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, geotecnia aplicada à mineração, volume único, Brasil.

[4] LI, X. et al. (2024) – “Clogging Mechanisms and Permeability Reduction in Granular Filters Subjected to Fine Particle Migration”, anais do International Conference on Geosynthetics, filtração e drenagem, volume único, China.

[5] BAI, Y. et al. (2025) – “Experimental Investigation of Clogging Processes in Granular Media under Long-Term Flow Conditions”, anais do International Conference on Porous Media, meios porosos e fluxo, volume único, Estados Unidos.

[6] LOPES, F. et al. (2024) – “Physical and Chemical Characterization of Bauxite Tailings for Engineering Applications”, anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, rejeitos de mineração, volume único, Brasil.

[7] PENG, Z. et al. (2024) – “Hydraulic Behaviour of Bauxite Residue under Different Environmental Conditions”, anais do International Conference on Tailings Management, gestão de rejeitos, volume único, Austrália.

[8] GONÇALVES, M. et al. (2024) – “Mechanical Behaviour of Bauxite Tailings under Varying Stress Paths”, anais do Simpósio Internacional de Geotecnia de Rejeitos, comportamento mecânico, volume único, Brasil.

[9] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA (2017) – “Method 1314: Liquid-Solid Partitioning as a Function of Liquid-to-Solid Ratio”, anais técnicos USEPA, ensaios de percolação, volume único, Estados Unidos.

[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1995) – “Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga variável”, anais técnicos ABNT, ensaios geotécnicos, volume único, Brasil.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016) – “Solo – Análise granulométrica (versão corrigida 2:2018)”, anais técnicos ABNT, caracterização de solos, volume único, Brasil.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1995) – “Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga variável”, anais técnicos ABNT, ensaios geotécnicos, volume único, Brasil.

	**Adriano CIUFFI** Engenheiro civil especialista em engenharia geotécnica, atuando em projetos voltados para a gestão de resíduos industriais de mineração. Experiência em projetos e fiscalização de obras geotécnicas, drenagem, instrumentação e terraplenagem, com foco em segurança e normas internacionais. Domínio de softwares técnicos e inglês avançado.
	**Cássia GOMES** Engenheira civil especialista em engenharia geotécnica, mestranda em engenharia de barragens e gestão ambiental. Atuando em projetos voltados para a gestão de resíduos industriais de mineração, com foco em fechamento progressivo de pilhas de resíduo de bauxita. Experiência em gestão de obras e contratos, fiscalização de obras geotécnicas e pavimentação asfáltica. Domínio de softwares técnicos e inglês.

	**Darivan COSTA** Engenheiro Civil com sólida experiência em obras de mineração, gestão de depósitos de resíduos sólidos e projetos de infraestrutura. Atualmente atua como Supervisor Operacional na Hydro Alunorte, destacando-se na fiscalização de obras, levantamentos topográficos e coordenação de equipes multidisciplinares.
	**João Wendell SANTOS** Engenheiro civil especialista em gerenciamento de projetos e pós-graduado em geotecnia aplicada com experiência em liderança de projetos e construção pesada principalmente no que tange a fiscalização de obras, legislação e normas técnicas, análise de desenhos técnicos, sistemas construtivos, materiais de

	construção, planejamento de obras, topografia e controle de qualidade em obras industriais, como por exemplo projetos de óleo & gás, geração de energia, mineração, barragens e infraestrutura.
	**Ronaldo PANTOJA** Engenheiro Civil graduado pela Universidade Federal do Pará (UFPA 1999). Especialista em Lavra de Mina (UFPA/2004), Engenharia Geotécnica Fundações e Obras de Terra (Universidade Cidade de São PAULO/2016) e Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental (UFPA).Atuei nas áreas de terra e rocha e técnica como engenheiro da Camargo Corrêa na fase II da UHE Tucuruí e Eclusas (2001 a 2003 Atualmente na Hydro-Alunorte Alumina Do Norte Do Brasil S.A. na Diretoria de Resíduos Bauxita e Alumina, B&A Taillings Area, na coordenação da área de geotecnia e segurança de barragem.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.1
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA BIM NO PROCESSO DE *DESIGN REVIEW* EM PROJETOS DE BARRAGENS DE REJEITOS

Thamires SOUZA
Arquiteta e Coordenadora BIM – Pimenta de Ávila Consultoria

Francisco SANTOS JUNIOR
Engenheiro Civil e BIM Manager – Vale S.A.

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação da metodologia BIM associada a um Ambiente Comum de Dados (CDE) na estruturação do processo de *Design Review* em um projeto de barragem de rejeitos, em fase de projeto básico com maturidade de detalhado. A abordagem teve como objetivo apoiar o desenvolvimento técnico do projeto por meio da centralização das informações, da rastreabilidade das revisões e da integração entre disciplinas.

Diferentemente do processo tradicional, baseado em documentos estáticos e revisões pontuais, a estruturação do *Design Review* em ambiente digital colaborativo possibilitou a identificação de inconsistências entre disciplinas, divergências entre representações e necessidade de alinhamento de premissas técnicas.

Em três meses, foram registradas 181 recomendações técnicas. Os resultados indicam melhoria na consistência das informações, maior integração entre equipes e maior clareza no processo de tomada de decisão.

O estudo está restrito à fase de desenvolvimento do projeto, não contemplando a execução. Ainda assim, os resultados indicam que a abordagem contribui para a melhoria da qualidade técnica e para a redução de incertezas no processo de projeto.

ABSTRACT

This paper presents the application of Building Information Modeling (BIM) combined with a Common Data Environment (CDE) to structure the Design Review process in a tailings dam project at basic design stage with detailed maturity. The approach aimed to support engineering development by improving information centralization, traceability and multidisciplinary integration.
Unlike traditional document-based reviews, the structured process enabled the identification of inconsistencies between disciplines, discrepancies between representations and misalignment of technical assumptions.
A total of 181 technical recommendations were recorded over three months. The results indicate improved information consistency, enhanced team integration and clearer decision-making processes.

The study is limited to the design phase and does not include construction. However, the approach contributes to improving technical quality and reducing uncertainties during project development.

1. INTRODUÇÃO

Projetos de barragens de rejeitos apresentam elevada complexidade técnica e elevado potencial de risco, o que exige processos robustos de revisão, verificação e tomada de decisão. Recomendações internacionais da *International Commission on Large Dams* (ICOLD) destacam a importância de revisões independentes e sistemáticas ao longo do ciclo de vida dessas estruturas, com foco na segurança, na governança e na rastreabilidade das decisões técnicas [1]. Nesse contexto, o *Design Review* constitui um dos principais instrumentos para a implementação dessas recomendações no âmbito dos projetos de engenharia.

Tradicionalmente, o *Design Review* em projetos de engenharia é conduzido com base em documentos bidimensionais, relatórios e desenhos técnicos, cuja elaboração demanda tempo significativo e condiciona o processo de revisão aos marcos formais de maturidade do projeto. A produção desses documentos envolve esforços adicionais de organização gráfica, padronização e adequação aos padrões de apresentação, sendo requisito prévio para a submissão à análise técnica. Como consequência, soluções ainda em desenvolvimento não são submetidas à revisão externa, em função da ausência de representação gráfica consolidada.

Adicionalmente, no processo tradicional, os comentários técnicos são elaborados com base em desenhos bidimensionais isolados, exigindo leitura cruzada de múltiplas pranchas, seções e detalhes, bem como elevada dependência da experiência individual dos revisores. Parte das incompatibilidades pode não ser identificada na fase de projeto e somente ser percebida durante a execução das obras, o que eleva o risco operacional, gera retrabalhos e compromete o desempenho do empreendimento.

Os registros de comentários são, em muitos casos, realizados por meio de diferentes plataformas, como relatórios, planilhas, e-mails ou sistemas internos, sem centralização em um ambiente único. Como consequência, as informações tendem a permanecer descentralizadas, com risco de perda de rastreabilidade, sobreposição de observações e dificuldades na consolidação do histórico decisório.

A metodologia BIM permite a centralização das informações em um Ambiente Comum de Dados (CDE), o uso de modelos tridimensionais como base para a análise técnica e a realização de revisões colaborativas de forma contínua. Nesse ambiente, o modelo digital passa a constituir o principal suporte para a comunicação do projeto, reduzindo a dependência da documentação bidimensional formalizada. Os comentários são registrados diretamente no CDE, por meio de sistemas digitais de gestão de *issues* vinculados aos elementos do modelo.

Diferentemente do processo tradicional, a abordagem baseada em BIM possibilita que as análises acompanhem a evolução das soluções ao longo do desenvolvimento do projeto, mesmo quando estas ainda se encontram em desenvolvimento, desde que devidamente contextualizadas. A revisão passa a ser integrada ao processo de concepção e detalhamento, ocorrendo de forma colaborativa entre as diferentes disciplinas e empresas envolvidas, com registro formal das decisões no ambiente digital.

Nesse contexto, o modelo tridimensional atua como elemento integrador, amplia a rastreabilidade das decisões técnicas e favorece a antecipação de análises críticas. Além dos ganhos organizacionais, a estruturação do *Design Review* associada ao uso da metodologia BIM permite identificar inconsistências entre disciplinas, avaliar soluções de forma integrada e apoiar decisões técnicas ao longo do desenvolvimento do projeto.

Insere-se nesse cenário o estudo de caso apresentado neste trabalho, aplicado a um projeto de barragem de rejeitos, com ênfase nos desafios enfrentados, nos resultados obtidos e nas contribuições da abordagem para o desenvolvimento do projeto de engenharia.

2. REFERENCIAL TÉCNICO E NORMATIVO

2.1. Evolução Histórica e Diretrizes Regulatórias do *Design Review*

O processo de *Design Review* teve origem em programas militares e aeroespaciais dos Estados Unidos no período do pós-guerra, quando se constatou que falhas de projeto em sistemas críticos poderiam resultar em perdas humanas e elevados custos [2][3]. Nesse contexto, o modelo de tentativa e erro não era considerado aceitável, o que levou à consolidação de procedimentos formais de revisão técnica integrados ao ciclo de desenvolvimento dos projetos.

Entre as décadas de 1970 e 1990, com a expansão de grandes obras de infraestrutura em escala global, especialmente barragens e obras civis de grande porte, o *Design Review* passou a ser adotado de forma mais sistemática em empreendimentos de alto risco. Nesse período, o *Project Management Institute* (PMI) incorporou revisões técnicas em seus modelos de gestão, contribuindo para sua institucionalização. A *International Commission on Large Dams* (ICOLD) também passou a incluir, em suas diretrizes, recomendações formais sobre revisão de projetos, supervisão técnica e governança de barragens.

Mesmo com o avanço dos marcos técnicos e regulatórios, ocorreram no Brasil acidentes de grande magnitude envolvendo barragens de rejeitos, destacando-se os rompimentos ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), com impactos ambientais, humanos e socioeconômicos relevantes.

A partir desses acidentes, o tema ganhou maior relevância no cenário internacional, com o fortalecimento das exigências regulatórias, institucionais e financeiras. Em 2020, foi publicado o *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM) [4], e normas da Agência Nacional de Mineração (ANM) [5] passaram a reforçar exigências relacionadas a auditorias técnicas, revisões de projeto e sistemas de monitoramento.

Nesse processo evolutivo, o *Design Review* consolidou-se como procedimento organizacional formal, essencial para a segurança das estruturas, para a governança dos empreendimentos e para a gestão sistemática dos riscos ao longo do ciclo de vida. A literatura técnica também indica que a avaliação do próprio trabalho está

sujeita a vieses cognitivos, o que reforça a relevância de processos estruturados e independentes de revisão.

2.2. Distinção entre Design Review e Processos Correlatos de Avaliação

Na prática da engenharia, diversos mecanismos são empregados para a verificação, validação e controle da qualidade dos projetos. Embora relacionados, esses processos apresentam escopos, objetivos e níveis de abrangência distintos, variando desde avaliações técnicas pontuais até instrumentos formais de governança.

A Tabela 1 apresenta os principais mecanismos de revisão em projetos de engenharia, com destaque para o papel integrador do *Design Review*.

Tabela 1: Principais mecanismos de revisão e controle da qualidade em projetos

Mecanismo	Objetivo	Escopo	Foco Principal	Natureza
Technical Review	Avaliar conteúdo técnico	Documento ou disciplina	Metodologia e parâmetros	Técnico
Peer Review	Validar soluções por pares	Disciplina	Correção técnica	Técnico
Independent Review	Garantir isenção	Projeto ou partes críticas	Conformidade e risco	Independente
Design Verification	Comprovar aderência formal	Projeto	Normas e contratos	Formal
Quality Review / Auditoria	Verificar processos	Sistema de gestão	Procedimentos e registros	Procedimental
Stage-Gate Review	Autorizar avanço de fases	Fase do projeto	Critérios técnicos e institucionais	Governança
Safety Review	Avaliar riscos	Sistemas críticos	Segurança e integridade	Especializado
Model Review (BIM)	Analisar modelos 3D	Modelo digital	Compatibilização	Colaborativo
Design Review	Avaliação integrada	Multidisciplinar	Interfaces e construtibilidade	Sistêmico

De modo geral, os mecanismos apresentados diferenciam-se quanto ao nível de aprofundamento, ao grau de independência e ao papel na governança dos empreendimentos. Enquanto revisões técnicas, verificações formais e auditorias tendem a apresentar caráter pontual, disciplinar ou procedimental, o *Design Review* destaca-se por sua natureza integradora, articulando diferentes modalidades de avaliação em um processo contínuo de suporte à tomada de decisão e à consolidação das soluções de projeto.

2.3. BIM, ISO 19650 e a Gestão da Informação no Processo de *Design Review*

A metodologia *Building Information Modeling* (BIM) caracteriza-se pela produção e pela gestão integrada de informações técnicas ao longo do ciclo de vida dos empreendimentos, por meio de modelos digitais tridimensionais associados a dados geométricos, físicos, funcionais e operacionais [6]. Diferentemente das abordagens tradicionais baseadas em documentação bidimensional isolada, o BIM organiza as informações do projeto em um ambiente colaborativo e favorece a coordenação entre disciplinas e a consolidação das decisões técnicas.

No âmbito dessa metodologia, a série de normas ISO 19650, publicada pela *International Organization for Standardization*, estabelece princípios para a organização, a produção, a validação e o compartilhamento da informação em projetos desenvolvidos com BIM [7][8]. A norma define a implantação de um Ambiente Comum de Dados (*Common Data Environment*), ou CDE, como elemento central da gestão dos dados e informações, no qual modelos, documentos e registros são controlados quanto à autoria, ao status, às versões e ao histórico de alterações.

A ISO 19650 estrutura os fluxos de informação em etapas formais de desenvolvimento, verificação, aprovação e publicação e assegura que apenas dados validados sejam utilizados como base para análises técnicas e decisões gerenciais.

No contexto do *Design Review*, esses fundamentos assumem papel relevante, uma vez que os processos de revisão dependem diretamente da disponibilidade de informações organizadas, confiáveis e rastreáveis. A centralização dos dados em um CDE estruturado permite o registro de comentários, recomendações e deliberações de forma vinculada aos modelos e documentos correspondentes, com preservação do histórico das análises.

Dessa forma, os princípios da ISO 19650 apresentam correlação direta com os requisitos do *Design Review*, especialmente no que se refere ao controle de versões, à formalização dos registros, à integração multidisciplinar e à rastreabilidade das decisões. A aplicação desses princípios no contexto BIM contribui para a estruturação de processos de revisão mais consistentes, transparentes e integrados à gestão do empreendimento.

2.4. Lacunas entre Requisitos Normativos e Prática operacional

Embora diretrizes internacionais, normas técnicas e recomendações institucionais estabeleçam requisitos claros para a condução de processos estruturados de *Design Review*, observa-se, na prática, a existência de lacunas recorrentes entre esses referenciais e os procedimentos efetivamente adotados no desenvolvimento dos projetos.

Entre os principais pontos de divergência, destaca-se a dificuldade na consolidação e na rastreabilidade das decisões técnicas, frequentemente associada à utilização de registros dispersos em diferentes plataformas e documentos. A fragmentação desses registros compromete a reconstrução do histórico das análises e a consolidação das justificativas técnicas.

De forma semelhante, a exigência de integração multidisciplinar contrasta com a organização tradicional dos projetos em silos disciplinares, nos quais as análises ocorrem de forma isolada, com intercâmbio limitado entre especialidades.

Adicionalmente, a manutenção de um histórico decisório estruturado, contendo recomendações, respostas, deliberações e responsabilidades, é frequentemente atendida por meio de trocas informais de informações, como e-mails, anotações dispersas e relatórios não integrados. Esse padrão reduz a transparência do processo, dificulta auditorias técnicas e fragiliza os mecanismos de governança.

Essas lacunas decorrem, em geral, das limitações das ferramentas tradicionalmente utilizadas para operacionalizar os processos de revisão em ambientes complexos e multidisciplinares. A dependência de fluxos documentais fragmentados e de plataformas não integradas restringe a consolidação e a contextualização das informações.

Nesse contexto, evidencia-se a necessidade de abordagens que permitam alinhar os requisitos normativos aos procedimentos operacionais. A incorporação de metodologias baseadas em BIM e em Ambientes Comuns de Dados estruturados apresenta-se como alternativa para reduzir essas lacunas, conforme descrito na metodologia apresentada a seguir.

3. METODOLOGIA

Este estudo foi conduzido por meio de um estudo de caso aplicado, com abordagem qualitativa e quantitativa, envolvendo a implementação de um processo estruturado de *Design Review* baseado em BIM em um projeto de barragem de rejeitos.

3.1. Caracterização do Estudo de Caso

O objeto deste estudo de caso é uma barragem de rejeitos, classificada como de elevado potencial de dano associado, conforme critérios regulatórios vigentes. O empreendimento insere-se no escopo de um complexo minerário de grande porte, submetido a rigorosos requisitos técnicos, ambientais e institucionais, em função dos riscos inerentes à sua operação.

O projeto encontrava-se em fase de projeto básico com maturidade de detalhado, e o principal objetivo era avaliar a viabilidade do alteamento considerando as condições atuais da estrutura e do entorno. Foram elaborados e analisados modelos multidisciplinares contemplando, entre outros aspectos, geotecnia, hidrologia, drenagem, estruturas, obras civis, acessos e sistemas auxiliares.

A elaboração dos projetos foi conduzida por uma empresa projetista especializada, responsável pelo desenvolvimento das soluções técnicas e pela consolidação dos modelos multidisciplinares. A coordenação do empreendimento foi realizada pela empresa denominada Contratante, na condição de proprietária do empreendimento e gestora do ambiente de dados do projeto, enquanto a empresa denominada Contratada Revisora atuou como revisora independente no processo de *Design Review*.

Ressalta-se que, de forma excepcional em relação às práticas tradicionais, o processo de *Design Review* foi conduzido de maneira contínua ao longo do desenvolvimento do projeto, e não restrito a marcos formais de entrega documental. Essa abordagem foi viabilizada pela adoção da metodologia BIM, associada à utilização das ferramentas e dos fluxos de trabalho estruturados em ambiente comum de dados (CDE), que permitiram o acompanhamento sistemático da evolução das soluções, o registro integrado das análises e a consolidação progressiva das decisões técnicas.

Os dados gerados nesse processo constituíram a base empírica para a análise apresentada nas seções subsequentes.

Esse contexto é particularmente relevante, pois as soluções ainda se encontram em desenvolvimento e sujeitas a ajustes, tornando o *Design Review* fundamental para a identificação de inconsistências e para a consolidação técnica do projeto.

3.2. Estruturação do Ambiente Comum de Dados (CDE)

O Ambiente Comum de Dados foi estruturado em uma plataforma digital corporativa, sob responsabilidade da Contratante, em conformidade com diretrizes internas e com os princípios da ISO 19650 [7][8].

A configuração do CDE contemplou a definição da arquitetura de pastas, dos fluxos de informação, dos níveis de acesso e dos procedimentos de controle documental. Os acessos foram organizados conforme a empresa de origem e a função desempenhada no projeto, com diferentes níveis de permissionamento para projetistas, revisores, coordenadores, gestores e fiscais do cliente.

Foram estabelecidas convenções padronizadas de nomenclatura, classificação e versionamento dos arquivos. Os contêineres de informação foram definidos conforme o grau de maturidade e validação, com distinção entre as fases *work in progress*, *shared* e *published*, conforme a ISO 19650 [7][8].

A estrutura de pastas foi organizada prioritariamente por tipologia de estrutura e por sistemas funcionais, em detrimento da divisão tradicional por disciplinas (geologia, geotecnia, hidrologia etc.), em função das especificidades dos projetos no contexto da mineração e da compatibilização com a lógica de planejamento por pacotes de trabalho, associada ao *Advanced Work Packaging* (AWP) [9], abordagem voltada à organização do projeto por pacotes de trabalho integrados.

Na estruturação do CDE, considerou-se o nível de maturidade BIM das empresas envolvidas. Em função da curva de aprendizado, determinadas práticas não atenderam integralmente a todos os requisitos normativos, tendo sido adotadas soluções intermediárias de caráter progressivo, com foco na estabilidade operacional e na consolidação dos procedimentos.

3.3. Definição dos Fluxos de *Design Review* Baseados em BIM

O processo de *Design Review* foi estruturado a partir de fluxos operacionais integrados ao ambiente BIM, com o objetivo de assegurar a condução sistemática das análises ao longo do desenvolvimento do projeto. Esses fluxos estabeleceram

procedimentos para submissão, avaliação, tratamento e validação das soluções técnicas, com responsabilidades claramente definidas.

O processo foi organizado em etapas sequenciais e iterativas, compreendendo:

1. Submissão dos modelos e documentos no CDE **(Contratada Projetista)**
2. Validação interna quanto à completude e à conformidade **(Contratada Projetista)**
3. Publicação para análise técnica **(Contratante)**
4. Avaliação pelos revisores **(Contratada Revisora)**
5. Consolidação das *issues* e direcionamento à projetista **(Contratante)**
6. Resposta e adequação pelas equipes responsáveis **(Contratada Projetista)**
7. Validação final e encerramento das pendências **(Contratada Revisora e Contratante)**

Esse fluxo assegurou o acompanhamento contínuo da evolução das soluções e a formalização progressiva das decisões técnicas.

Ao longo do processo, os coordenadores BIM das empresas envolvidas exerceram papel central na organização da informação, na padronização dos procedimentos e no suporte operacional às equipes técnicas. Esses profissionais atuaram no esclarecimento de dúvidas relacionadas ao uso do ambiente comum de dados, à aplicação dos fluxos BIM e ao cumprimento dos protocolos estabelecidos, especialmente em função do nível heterogêneo de maturidade digital das equipes e das particularidades do setor de mineração.

Essa atuação contribuiu para a redução de inconsistências operacionais e para a consolidação progressiva das práticas adotadas.

3.4. Sistema de Registro e Tratamento de *Issues*

No contexto deste estudo, as *issues* corresponderam aos registros formais das observações, comentários e recomendações técnicas decorrentes do processo de *Design Review*, equivalentes aos apontamentos tradicionalmente consolidados em relatórios, planilhas ou memorandos em processos convencionais.

O registro dessas observações ocorreu por meio do sistema de gestão de *issues* integrado ao ambiente comum de dados (CDE), com vinculação direta das pendências aos elementos do modelo tridimensional e aos documentos correspondentes, o que assegurou a contextualização geométrica e funcional das análises.

Cada *issue* apresentou campos padronizados, incluindo disciplina, descrição, categoria, severidade, prioridade, responsável, prazo e status. As pendências foram classificadas segundo o tipo de problema, sua origem e seu impacto potencial.

O sistema permitiu a extração periódica de relatórios consolidados das *issues* em formato tabular, os quais subsidiaram o acompanhamento do desempenho do processo, a análise dos indicadores e a consolidação dos resultados apresentados neste estudo.

O ciclo de vida das *issues* seguiu o fluxo: criação, análise, resposta, validação e encerramento. Esse mecanismo assegurou rastreabilidade, transparência e controle sistemático do tratamento das recomendações técnicas.



Figura 1. Exemplo de Registro de *issues* no modelo inserido no ambiente comum de dados (CDE). Fonte: Elaboração própria.

3.5. Instrumentos de Coleta, Análise dos Dados e Limitações

A coleta de dados baseou-se em duas fontes principais: os registros de *issues* no ambiente comum de dados (CDE) e os formulários estruturados aplicados aos participantes do processo de *Design Review*. Os registros de *issues* forneceram a base objetiva para a análise do desempenho do processo, enquanto os formulários foram utilizados como instrumento de controle da qualidade, monitoramento do processo e apoio às ações de melhoria contínua, registrando a percepção dos participantes quanto à efetividade do *Design Review*, às dificuldades operacionais e aos benefícios observados.

A avaliação baseada em formulários considerou respostas provenientes de diferentes projetos conduzidos no mesmo contexto organizacional, além do projeto analisado como estudo de caso, com o objetivo de ampliar a base empírica e subsidiar análises comparativas. A amostra reuniu profissionais de diferentes funções, níveis de experiência e empresas, majoritariamente com experiência profissional superior a seis anos e participação recorrente em processos de *Design Review*. Os formulários foram estruturados para captar percepções quanto à efetividade do processo, à qualidade da informação, à integração entre as equipes, às dificuldades operacionais e ao impacto do *Design Review* nos resultados do projeto.

A análise objetiva do processo baseou-se nos registros de *issues* da plataforma digital do projeto, considerando exclusivamente o contexto de um único projeto, no qual foi possível acompanhar integralmente o ciclo de abertura, tratativa e encerramento das recomendações. Foram definidos indicadores quantitativos, incluindo número total de *issues*, distribuição por tipologia e por estrutura analisada, tempo médio de resposta, taxa de encerramento e reincidência, bem como indicadores qualitativos relacionados à natureza das recomendações, à clareza das decisões, ao nível de integração entre as equipes e à rastreabilidade das tratativas. Diferentemente da análise baseada nos formulários, aplicada a múltiplos projetos por seu caráter transversal, a restrição a um

único projeto no caso das *issues* visou garantir consistência analítica e evitar vieses decorrentes de distintos contextos de projeto.

O estudo apresenta limitações inerentes à sua natureza aplicada, ao uso de um único estudo de caso para a análise detalhada dos dados técnicos e ao contexto organizacional específico em que foi desenvolvido. Embora os formulários tenham contemplado diferentes projetos no mesmo ambiente institucional, o período analisado não abrangeu todas as fases do ciclo de vida dos empreendimentos. Adicionalmente, a heterogeneidade do nível de maturidade BIM das equipes e a curva de aprendizado associada ao uso do ambiente comum de dados (CDE) influenciaram o desempenho do processo, devendo essas condições ser consideradas na interpretação dos resultados. Destaca-se que a análise realizada está restrita à fase de desenvolvimento do projeto e não contempla a etapa de execução.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante um período de três meses, foram registradas 181 recomendações técnicas, distribuídas entre diferentes disciplinas do projeto. As recomendações técnicas estiveram predominantemente associadas à identificação de inconsistências entre disciplinas, divergências entre representações de projeto e necessidade de alinhamento de premissas técnicas. De forma geral, observaram-se incompatibilidades entre soluções propostas por diferentes disciplinas, inconsistências geométricas e lacunas na definição de interfaces entre sistemas.

As recomendações identificadas apresentaram diferentes impactos no desenvolvimento do projeto. As inconsistências entre disciplinas estiveram associadas à necessidade de revisão e compatibilização das soluções propostas, com impacto na coerência técnica global do projeto. As inconsistências geométricas influenciaram a confiabilidade das representações e a consistência entre modelos e documentos técnicos. Já as recomendações relacionadas ao alinhamento de premissas evidenciaram a necessidade de padronização de critérios técnicos entre as equipes.

A organização das *issues* por tipologia e por estrutura analisada, juntamente com o controle dos fluxos de revisão, favoreceu a comunicação entre revisores e projetistas. Observou-se menor repetição de recomendações sobre os mesmos temas ao longo das etapas analisadas, o que indica redução de retrabalho nessa fase. Essa evidência é consistente com a percepção dos participantes registrada no formulário. A identificação dessas situações ocorreu durante o desenvolvimento do projeto, permitindo sua tratativa em tempo oportuno. Embora o projeto não tenha avançado para a fase de execução, os resultados indicam melhoria na consistência das informações e na qualidade das decisões técnicas.

Os resultados do formulário indicam avaliação predominantemente positiva quanto à qualidade da informação disponibilizada, com destaque para a clareza das informações nos modelos e documentos, a confiabilidade das versões e a compreensão das soluções de projeto por meio do uso do BIM. Entretanto, uma parcela dos respondentes registrou avaliações neutras ou negativas, especialmente relacionadas ao cumprimento de prazos, à complexidade inicial dos fluxos e à clareza

na atribuição de responsabilidades em determinadas situações, indicando fragilidades operacionais no início da implementação do processo.

No que se refere à integração e colaboração, a análise integrada demonstra que o uso do modelo tridimensional como base das discussões favoreceu análises multidisciplinares e aumentou a produtividade das reuniões técnicas. Ainda assim, as respostas negativas e neutras apontam que esses ganhos não se manifestam de forma homogênea entre as equipes, sendo influenciados pelo nível de familiaridade com o ambiente comum de dados (CDE) e pela maturidade BIM dos participantes.

Como o projeto não avançou para a fase de execução, os resultados se restringem ao processo de desenvolvimento e indicam melhoria na consistência das informações, na integração entre disciplinas e na qualidade das decisões técnicas. No entanto, esses resultados evidenciam o papel do *Design Review* estruturado como mecanismo de controle técnico do projeto, indo além de um procedimento de verificação.

5. CONCLUSÕES

A aplicação da metodologia BIM no processo de *Design Review* demonstrou potencial para estruturar revisões técnicas de forma contínua, integrada e rastreável em projetos de barragens de rejeitos. A abordagem permitiu centralizar informações, registrar recomendações de forma estruturada e acompanhar a evolução das soluções ao longo do desenvolvimento do projeto.

A análise das recomendações técnicas evidenciou a identificação de inconsistências entre disciplinas, divergências entre representações e necessidade de alinhamento de premissas, aspectos críticos em projetos multidisciplinares. Os resultados indicam melhoria na consistência das informações, maior integração entre equipes e maior clareza no processo decisório.

O estudo está restrito à fase de desenvolvimento do projeto, não contemplando a execução. Ainda assim, os resultados indicam que a abordagem contribui para o aprimoramento da qualidade técnica das soluções propostas e para a redução de incertezas no processo de projeto.

Recomenda-se a aplicação da abordagem em diferentes fases do ciclo de vida e em múltiplos empreendimentos, com o objetivo de avaliar sua contribuição também na etapa de execução.

6. PALAVRAS-CHAVE

BIM, *Design Review*, Barragem de Rejeitos, Segurança de Barragens, Ambiente Comum de Dados (CDE).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD (2021) – *Tailings Dam Design – Technology Update*, Bulletin 181, Paris.

[2] BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J. (2011) – *Systems Engineering and Analysis*, 5ª edição, Prentice Hall, Upper Saddle River.

[3] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA (2007) – *NASA Systems Engineering Handbook*, *NASA/SP-2007-6105 Rev.1*, Washington, D.C.

[4] GLOBAL TAILINGS REVIEW (2020) – *Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM)*, London.

[5] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM (2022) – *Resolução nº 95/2022 – Estabelece regras para segurança de barragens de mineração*, Brasília.

[6] EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. (2011) – *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*, 2ª edição, John Wiley & Sons, Hoboken.

[7] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO (2018) – *ISO 19650-1: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) – Part 1: Concepts and principles*, Geneva.

[8] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO (2018) – *ISO 19650-2: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) – Part 2: Delivery phase of the assets*, Geneva.

[9] CONSTRUCTION INDUSTRY INSTITUTE – CII (2013) – *Advanced Work Packaging: Design, Construction, and Commissioning Integration*, Implementation Resource 272-2, Austin, Texas.

	**Thamires SOUZA** Arquiteta e Urbanista pela UFMG, com especialização em Gerenciamento de Projetos pela FGV. Atua desde 2016 em projetos geotécnicos, com foco em barragens de rejeitos. Experiência em coordenação BIM e integração multidisciplinar.
	**Francisco SANTOS JUNIOR** Engenheiro Civil e especialista em BIM, com formação internacional pela Zigurat/Universitat de Barcelona. Atua como BIM Manager em projetos geotécnicos, com experiência em projetos internacionais. Palestrante e coordenador em programas de pós-graduação voltados ao uso de BIM em engenharia.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.1
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

COMPARAÇÃO ENTRE ANÁLISES POR EQUILÍBRIO LIMITE E ANÁLISES TENSÃO–DEFORMAÇÃO COM AUMENTO DE GRAVIDADE NA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE REJEITO

Ian PAES
MSc Geotecnia - Pimenta de Ávila

Sarah FAYER
Esp Geotécnica - Pimenta de Ávila

RESUMO

A avaliação da estabilidade de barragens de rejeito é tradicionalmente conduzida por meio de análises por equilíbrio limite (EL), metodologia ainda amplamente utilizada para fins regulatórios em todo o mundo. Entretanto, análises tensão-deformação baseadas em modelos numéricos avançados têm demonstrado maior capacidade de representar mecanismos progressivos de ruptura associados ao comportamento frágil de rejeitos suscetíveis à liquefação estática. Este trabalho apresenta uma comparação entre análises por equilíbrio limite, utilizando o método das fatias, e análises tensão-deformação empregando o Método dos Elementos Finitos (FEM) associado à técnica de aumento progressivo da gravidade (GIM, gravity increase method) para estimativa do fator de segurança. As análises foram conduzidas com base na geometria, condições de nível d'água e parâmetros constitutivos do exercício comparativo de estabilidade de barragens de rejeito proposto por Reid e Fourie (2023). As análises tensão-deformação foram realizadas com o modelo constitutivo NorSand, baseado na mecânica dos solos do estado crítico, que permite representar a mobilização e perda progressiva de resistência, redistribuição de tensões e propagação de bandas de cisalhamento em materiais contráteis. Ambas as abordagens capturam a redução progressiva da estabilidade com a elevação do nível freático; entretanto, diferenças significativas foram observadas quanto à magnitude dos fatores de segurança e à caracterização dos mecanismos de instabilidade. As análises por EL indicaram fatores de segurança inferiores à unidade para as condições de nível freático mais elevadas, enquanto as análises GIM mantiveram FS superiores à unidade em todos os cenários analisados, com redução progressiva à medida que a superfície freática se elevou. As trajetórias de tensões evidenciaram comportamento de strain-softening e geração de excessos de poropressão próximos ao talude de jusante, compatíveis com o gatilho de liquefação estática. Os resultados destacam o valor complementar das análises numéricas avançadas na identificação de regiões críticas e mecanismos de ruptura progressiva que abordagens convencionais por equilíbrio limite não são capazes de representar adequadamente.

ABSTRACT

The stability assessment of tailings dams is traditionally performed using limit equilibrium (LE) analyses, a methodology still widely adopted for regulatory purposes worldwide. However, stress-strain analyses based on advanced numerical models have demonstrated greater capability to represent progressive failure mechanisms associated with the brittle behavior of liquefiable tailings. This paper presents a comparison between limit equilibrium analyses, using the method of slices, and stress-strain analyses employing the Finite Element Method (FEM) combined with the gravity increase method (GIM) for factor of safety estimation. The analyses were conducted using the geometry, phreatic conditions, and constitutive parameters from the tailings dam stability comparative exercise proposed by Reid and Fourie (2023). Stress-strain analyses were performed using the NorSand constitutive model, based on critical state soil mechanics, which enables the representation of progressive strength mobilization and loss, stress redistribution, and shear band propagation in contractive materials. Both approaches captured the progressive reduction in stability with rising phreatic levels; however, significant differences were observed in the magnitude of safety factors and in the characterization of failure mechanisms. LE analyses yielded safety factors below unity for the highest phreatic conditions, while GIM analyses maintained factors of safety above unity across all scenarios, progressively decreasing as the phreatic surface rose. Stress path results evidenced strain-softening behavior and excess pore pressure generation near the downstream slope, consistent with static liquefaction triggering. The findings highlight the complementary value of advanced numerical analyses in identifying critical regions and progressive failure mechanisms that conventional LE approaches are unable to capture adequately.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação da estabilidade de barragens de rejeito é tradicionalmente conduzida por meio de análises de equilíbrio limite (EL), metodologia ainda amplamente utilizada para fins regulatórios e verificação da segurança de estruturas de contenção de rejeito. Entretanto, análises tensão-deformação baseadas em modelos numéricos avançados têm demonstrado maior capacidade de representar mecanismos progressivos de ruptura associados ao comportamento frágil de rejeitos suscetíveis à liquefação.

Falhas relevantes de barragens de rejeito associadas à liquefação estática têm impulsionado discussões sobre limitações de abordagens tradicionais de estabilidade e sobre a necessidade de metodologias capazes de representar adequadamente mecanismos de ruptura progressiva em materiais contráteis. Nesse contexto, Reid e Fourie (2023) desenvolveram um exercício comparativo envolvendo a previsão de instabilidade por diferentes participantes, incluindo pesquisadores e especialistas da consultoria geotécnica da indústria da mineração, no qual foram aplicadas diferentes metodologias de análise de estabilidade a barragens de rejeito suscetíveis à liquefação, resultando em variabilidade significativa de conclusões entre os participantes.

Neste trabalho é apresentada uma comparação entre análises por equilíbrio limite, utilizando o método das fatias, e análises tensão-deformação empregando o Método dos Elementos Finitos (FEM) associado à técnica de aumento progressivo da gravidade (gravity increase method) para estimativa do fator de segurança. As análises foram realizadas utilizando como referência as geometrias, condições de nível d'água e parâmetros constitutivos apresentados no estudo de Reid e Fourie (2023). As análises numéricas foram conduzidas com o modelo constitutivo NorSand (Jefferies e Been, 2016) baseado na teoria da plasticidade e do estado crítico, permitindo representar a mobilização ou perda progressiva de resistência, redistribuição de tensões e propagação de bandas de cisalhamento em materiais contráteis.

Ademais, a técnica numérica de aumento de gravidade consiste na amplificação progressiva da gravidade até que o modelo não obtenha convergência numérica, caracterizando a condição de ruptura numérica. Sob a ótica do estado limite último, a gravidade real representa a condição de serviço, enquanto a gravidade que causa a ruptura corresponde à capacidade última do sistema. Embora o procedimento não represente diretamente um gatilho físico real, os resultados permitem identificar regiões críticas potencialmente associadas a mecanismos de instabilidade e liquefação estática. Esta técnica é análoga à empregada por Liu et al. (2024) em análises de vulnerabilidade à liquefação do Fundão e à empregada por Rógenes et al. (2025) na barragem B1.

2. ESTUDO DE CASO E METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido com base no exercício comparativo de estabilidade de barragens de rejeito proposto por Reid e Fourie (2023), elaborado com o objetivo de avaliar a variabilidade de resultados obtidos por diferentes praticantes e metodologias de análise aplicadas a materiais suscetíveis à liquefação estática. No presente trabalho foram adotadas as mesmas geometrias, condições de nível d'água e parâmetros constitutivos disponibilizados no benchmark original.

O benchmark consiste em uma barragem de rejeito hipotética desenvolvida a partir de características representativas de estruturas reais, incluindo geometria típica de barragens alteadas a montante, contendo rejeitos contráteis e elevação progressiva do nível freático como mecanismo potencial de gatilho para instabilidade. O estudo reuniu participantes empregando análises por equilíbrio limite, abordagens baseadas em trajetórias de tensões e análises numéricas avançadas, tendo sido observada elevada dispersão entre os resultados obtidos.

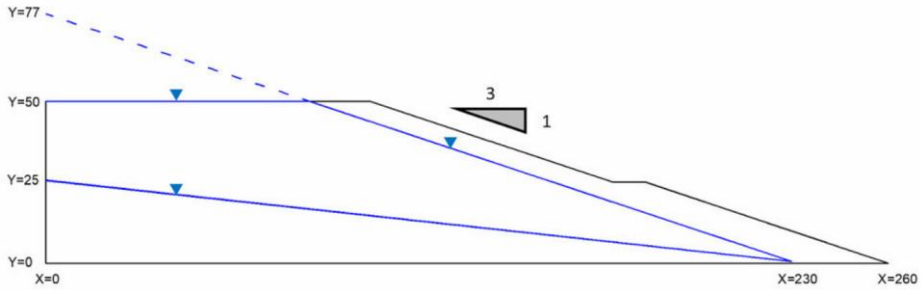


Figura 1 – Geometria do exercício de estabilidade (Reid e Fourie, 2023)

2.1 GEOMETRIA E CONDIÇÕES DE NÍVEL D'ÁGUA

A geometria analisada corresponde a uma barragem de rejeito com aproximadamente 50 m de altura e inclinação global próxima de 1V:3H, incluindo uma berma intermediária posicionada na meia encosta, conforme configuração proposta no benchmark de Reid e Fourie (2023).

O exercício executado no presente trabalho consiste na avaliação da estabilidade para a elevação progressiva do nível freático no interior do reservatório, promovendo redução das tensões efetivas e aproximação do estado de tensões da linha de instabilidade, gerando condições cada vez mais próximas de um gatilho de liquefação. Foram consideradas cinco condições de NA incluindo a inferior, superior e 3 intermediárias com os mesmos traçados propostos no benchmark original.

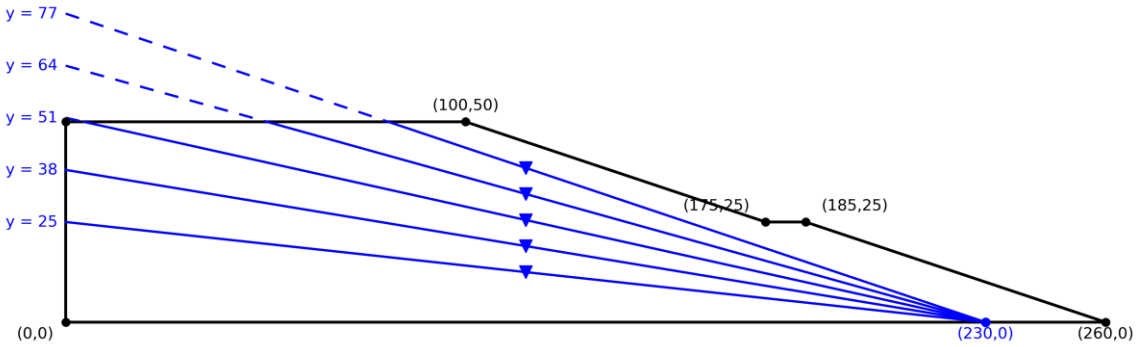


Figura 2 – Localização dos níveis d'água simulados.

2.2 ANÁLISES POR EQUILÍBRIO LIMITE

As análises por equilíbrio limite foram conduzidas pelo método de Morgenstern-Price, que considera simultaneamente o equilíbrio global de forças e momentos ao longo da superfície potencial de ruptura. A busca pela condição crítica foi realizada considerando superfícies de ruptura não circulares, utilizando o algoritmo *Particle Swarm Search* como método principal de busca e o método *Surface Altering* como procedimento de otimização local da geometria das superfícies identificadas. Essa combinação permitiu a determinação do menor fator de segurança associado aos mecanismos potenciais de instabilidade. Para as análises, foi utilizado o *software* Slide2, da Rocscience.

Foram adotados os parâmetros de resistência definidos no benchmark de referência, considerando hipóteses compatíveis com condições não drenadas para os rejeitos saturados suscetíveis à liquefação e drenada acima da freática, conforme resumido na Tabela 1. Efeitos de saturação parcial foram ignorados.

Tabela 1 – Parâmetros de resistência e peso específico adotados nas análises por equilíbrio limite

Parâmetro	Cenário A	Cenário B	Descrição
Y	20 kN/m³	20 kN/m³	Peso específico
ϕ'_{cs}	36°	36°	Ângulo de atrito no estado crítico
S_{u_pico}/σ'_v	0,23	0,13	Resistência não drenada de pico
S_{u_res}/σ'_v	0,10	0,04	Resistência não drenada residual

2.3 MODELO CONSTITUTIVO E PARÂMETROS

As análises tensão-deformação foram conduzidas utilizando o modelo constitutivo NorSand para os rejeitos, baseado na teoria da plasticidade e na mecânica dos solos do estado crítico, modelo amplamente empregado na avaliação do comportamento de materiais granulares contráteis suscetíveis à liquefação estática. Uma revisão abrangente e detalhada sobre a aplicação prática do modelo é apresentada no livro

texto de Jefferies e Been (2016). A Figura 3 apresenta resultados da simulação numérica de um ensaio CIU em material fofo, evidenciando a capacidade do modelo constitutivo de reproduzir o comportamento de amolecimento no cisalhamento não drenado. A ferramenta disponibilizada pelos autores permite interação online com os resultados da simulação, constituindo recurso didático relevante para compreensão do comportamento do modelo constitutivo.

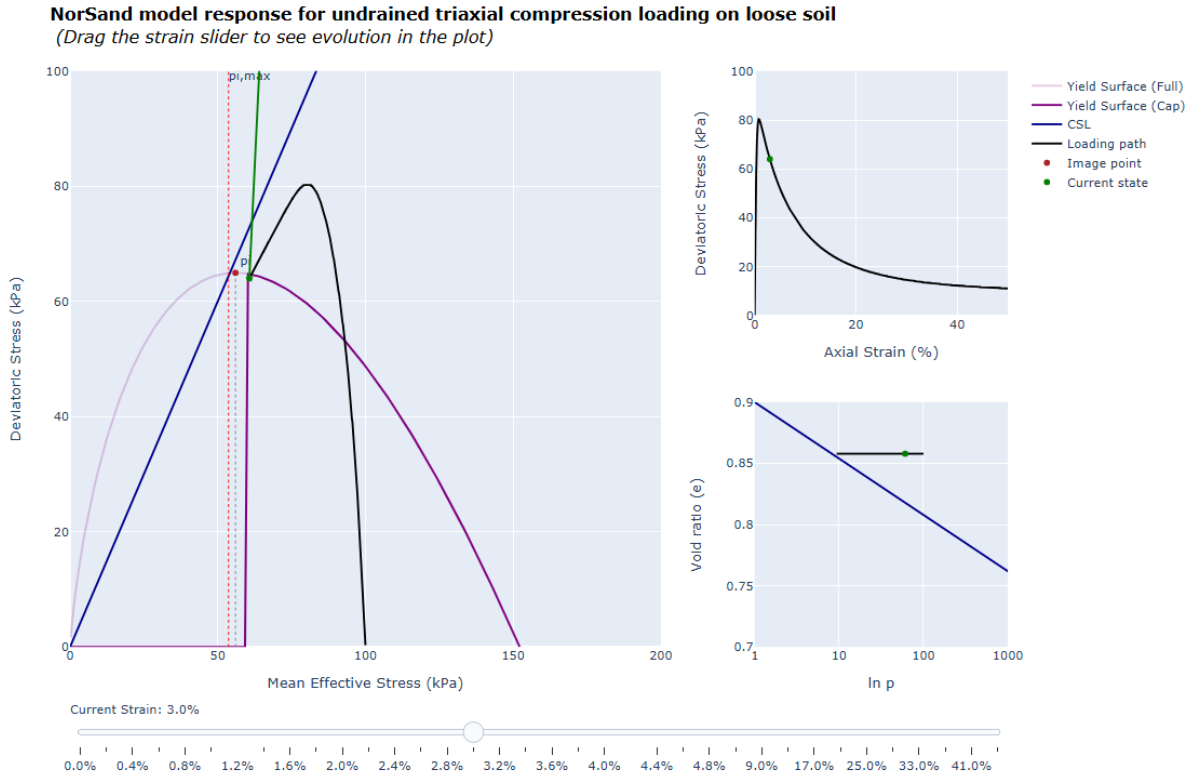


Figura 3 – Simulação interativa de ensaio triaxial CIU em material fofo saturado (fonte: https://srinivas12viv.github.io/NorSand/, acesso em julho de 2026)

A aplicação do modelo NorSand possibilita representar a evolução do estado de tensões durante um carregamento, incluindo redistribuição de tensões, concentração de deformações, desenvolvimento de bandas de cisalhamento, mobilização/perda de resistência, geração de poropressões. Tal abordagem difere significativamente das análises convencionais por equilíbrio limite, nas quais o mecanismo de ruptura é previamente assumido e o fator de segurança é obtido a partir de condições globais de equilíbrio.

Os parâmetros do NorSand adotados foram baseados diretamente no benchmark de Reid e Fourie (2023), o qual utiliza parâmetros calibrados a partir de materiais representativos de rejeitos associados a casos históricos de liquefação estática. O conjunto de parâmetros contempla propriedades elásticas, parâmetros de estado crítico e parâmetros relacionados ao endurecimento plástico e dilatância do material. A Tabela 2 apresenta os parâmetros utilizados nas análises numéricas.

Tabela *2 – Parâmetros NorSand (Reid e Fourie, 2023)*

Parâmetro	Cenário A	Cenário B	Descrição
Γ	0,920	0,740	Intercepto da CSL
λ_e	0,021	0,050	Inclinação da CSL
M_{tc}	1,45	1,45	Razão de tensões no estado crítico
ϕ'_{cs}	36°	36°	Ângulo de atrito no estado crítico
N	0,30	0,25	Parâmetro de acoplamento volumétrico
X	6,3	7,2	Constante de dilatância
H	125 – 690ψ	45 – 350ψ	Parâmetro de endurecimento
G*	$50*(p'/100)^{0,42}$	$15*(p'/100)^{0,72}$	Módulo cisalhante elástico
Ψ_0	0,03	0,15	Parâmetro de estado

Nota: O parâmetro de estado (ψ) foi definido com base em correlações empíricas com ensaio CPTu, sendo adotado o percentil 80 da distribuição dos resultados.

O comportamento típico de perda de resistência no cisalhamento não drenado de solos granulares (incluindo rejeitos) envolve a ocorrência de um pico de resistência com razão de tensões (η = q/p') inferior à envoltória de estado crítico (M_θ). Essa assinatura de comportamento é amplamente documentada na literatura por meio do conceito da linha de instabilidade (instability line), segundo o qual o colapso ocorre quando η ultrapassa o valor crítico ηIL. Assim, o gatilho para liquefação estática se manifesta para valores de η/M_θ significativamente inferiores à unidade, sobretudo em materiais em estado fofo.

As tensões são descritas em termos de invariantes de tensão efetiva, utilizando a pressão média efetiva p' e o desviador de tensões q, definidos respectivamente por:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} \tag{1}$$

$$q = \sqrt{\frac{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2}{2}} \tag{2}$$

A razão de tensões η é então definida como η = q/p'. Em compressão triaxial (TC), a razão de tensões no estado crítico M_{tc} corresponde ao valor de η = q/p' atingido quando o material alcança o estado crítico em compressão triaxial:

$$M_{tc} = \left(\frac{q}{p'}\right)_{EC} = \frac{6\,sen\,\varphi'_{cs}}{3 - sen\,\varphi'_{cs}} \tag{3}$$

Para estados de tensão arbitrários no plano deviatórico, a razão de tensões no estado crítico depende do ângulo de Lode θ, que descreve a posição do estado de tensões no plano deviatórico em relação aos eixos triaxiais de compressão (θ = +30°) e

extensão (θ = −30°). Adotando a expressão de Sheng et al. (2000), incorporada à formulação do NorSand (Jefferies e Been, 2016), M_θ em função de θ é dado por:

$$M_\theta = M_{tc} - \frac{{M_{tc}}^2}{3 + M_{tc}} \cos\left(\frac{3\theta}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (4)$$

De modo que M_{tc} corresponde a θ = +30° e M_{te} a θ = −30°. Sendo: $M_{te} < M_{tc}$ para qualquer $\varphi'_{cs} > 0$. Portanto a resistência efetiva desenvolvida pelo modelo constitutivo NorSand depende do modo de cisalhamento. Para os parâmetros adotados no presente estudo os valores de M_θ para diferentes modos de cisalhamento são indicados na Tabela 3.

Tabela 3 – Variação da resistência efetiva M em função do ângulo de Lode (θ) para diferentes modos de cisalhamento

Modo de Cisalhamento	**θ**	**M_θ**
Compressão triaxial (TC)	+30°	1,45
Deformação plana (PS)	+21°	~1,34
Cisalhamento simples (DSS)	0°	~1,12
Extensão triaxial (TE)	−30°	~1,00

A linha de instabilidade (IL) é definida no espaço *p′*×*q* como o lugar geométrico dos picos de resistência não drenada de materiais contráteis, abaixo da envoltória de estado crítico (Jefferies e Been, 2016). O colapso ocorre quando η ultrapassa o valor crítico η_{IL}, com $\eta_{IL}/M_\theta < 1$ para materiais em estado fofo. Quanto maior o parâmetro de estado ψ, mais baixa é a posição da linha de instabilidade e, consequentemente, maior a suscetibilidade à liquefação estática, comportamento diretamente representado pelo modelo NorSand nas análises conduzidas neste trabalho.

2.4 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

As análises numéricas foram conduzidas em condição bidimensional de deformação plana, utilizando malha de elementos finitos refinada. O modelo é composto por 17.271 elementos finitos triangulares de 15 nós totalizando 139.367 nós. Uma representação esquemática de um elemento e a malha gerada para o modelo tensão-deformação são apresentadas na Figura 4.

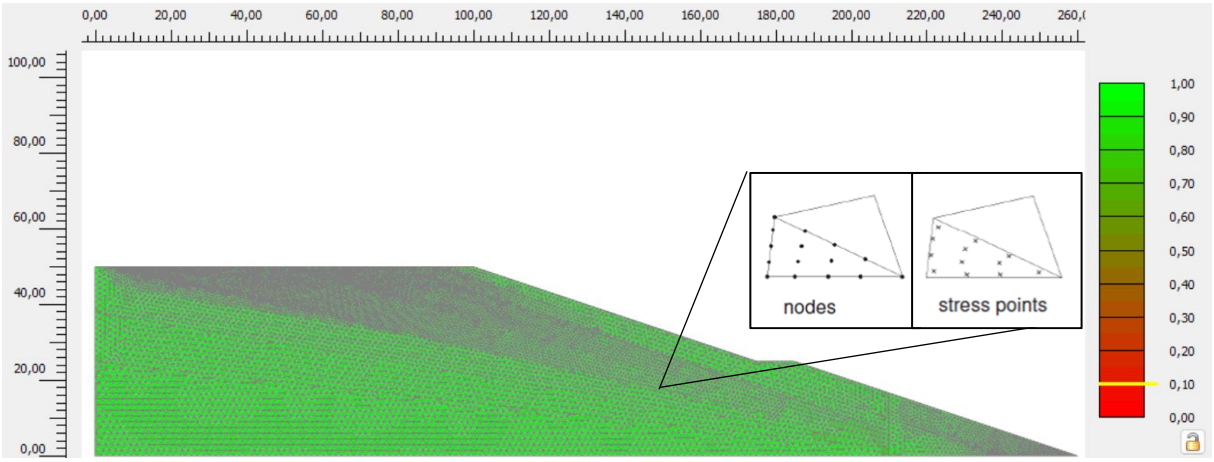


Figura 4 – Configuração da malha no modelo e representação do elemento triangular conforme o manual do PLAXIS (PLAXIS BV, 2024).

As condições de contorno mecânicas adotadas consistiram na restrição horizontal (Ux = 0), permitindo deslocamentos apenas na direção vertical, enquanto a base do modelo recebeu restrição total (Ux = Uy = 0), assegurando a estabilidade global do domínio numérico. A Figura 4 ilustra as condições de contorno descritas. As condições hidráulicas foram representadas por meio da definição das superfícies freáticas correspondentes às etapas analisadas, conforme apresentado na Figura 2.

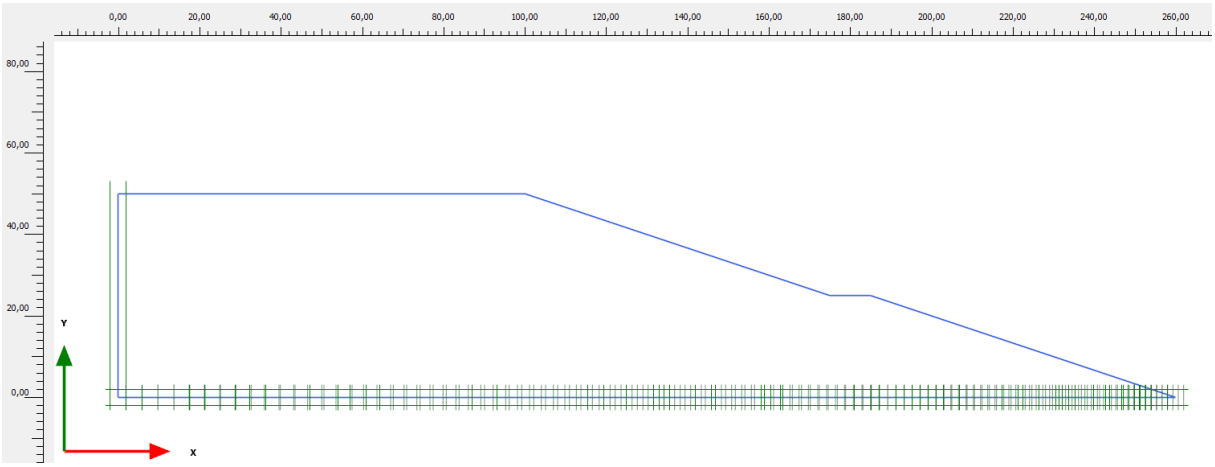


Figura 5 - Geometria e condições de contorno do modelo

O estado inicial de tensões do modelo numérico foi estabelecido no PLAXIS por meio do procedimento K_0 procedure, adotando-se uma razão de tensões em repouso igual a 0,6, valor situado na faixa considerada pelos participantes do exercício de referência e próximo ao valor de 0,7 utilizado por Reid e Fourie (2023) na interpretação do CPTu pelo método de Plewes. A condição inicial foi gerada considerando o equilíbrio geostático devido ao peso próprio dos materiais, com cálculo das poropressões em condição freática (*phreatic*).

2.5 ANÁLISES TENSÃO–DEFORMAÇÃO COM AUMENTO DE GRAVIDADE

As análises numéricas foram conduzidas por meio do Método dos Elementos Finitos utilizando a técnica de aumento progressivo da gravidade (GIM, *gravity increase method*). O procedimento consiste na amplificação incremental das forças gravitacionais aplicadas ao modelo até que não seja mais possível alcançar equilíbrio estático, caracterizando a condição de ruptura da estrutura.

Sob a ótica do estado limite último, a gravidade real corresponde à condição de serviço da barragem, enquanto a gravidade última representa a capacidade última do sistema. O fator de segurança pode então ser interpretado como a razão entre a gravidade última e a gravidade de serviço:

$$FoS_{GIM} = \frac{gravidade\ última}{gravidade\ de\ serviço} \tag{5}$$

A técnica permite avaliar a evolução progressiva das deformações e identificar regiões críticas associadas à concentração de deformações plásticas e desenvolvimento de bandas de cisalhamento. Embora o método não represente explicitamente um gatilho físico real, sua aplicação fornece uma interpretação consistente da capacidade resistente global da estrutura e dos mecanismos progressivos de instabilidade em rejeitos suscetíveis à liquefação estática.

Cabe destacar que o fator de segurança obtido pelo GIM possui natureza distinta do fator de segurança convencional das análises por equilíbrio limite. Enquanto o FS por EL representa a razão entre esforços resistentes e atuantes ao longo de uma superfície de ruptura assumida, o FoS_{GIM} constitui um multiplicador de carga, representando a margem de amplificação gravitacional que o sistema suporta antes da perda de equilíbrio. Como a amplificação da gravidade altera simultaneamente as solicitações e o estado de tensões efetivas (e, portanto, a resistência mobilizável), os dois fatores não são grandezas estritamente intercambiáveis, e sua comparação deve ser interpretada como indicador de tendência, e não como equivalência numérica direta.

Para o aumento da gravidade o modelo foi configurado como não acoplado para uma resposta completamente não drenada. Dentro do *Plaxis*, o modo "*plastic calculation*" é usado para executar considerando o carregamento rápido em materiais de baixa permeabilidade para representar o caso limite de comportamento totalmente não drenado - Undrained (A) - nos dados do material.

O aumento de gravidade é executado a partir do aumento do parâmetro ΣM_{weight} do menu das "phases". O parâmetro ΣM_{weight} representa o multiplicador global aplicado ao peso específico dos materiais. Quando $\Sigma M_{weight} = 1$, os pesos específicos definidos nos conjuntos de dados de materiais são utilizados sem alteração. De modo geral, este parâmetro permanece em seu valor padrão igual a 1, porém nesta análise o multiplicador alvo foi definido como 1,5, aplicado de forma incremental para simular o aumento artificial de carga. Quando a ruptura numérica ocorre antes de o alvo ser atingido, o valor do multiplicador alcançado define o fator de segurança; quando o alvo

é atingido sem perda de convergência, o valor de 1,5 constitui um limite inferior do fator de segurança.

Cabe destacar que as análises tensão-deformação com aumento de gravidade foram conduzidas apenas para o Cenário A. O Cenário B, caracterizado por parâmetro de estado $\psi_0 = 0{,}15$, representa um material significativamente mais fofo e contrátil, para o qual não foi possível obter convergência numérica já na fase de inicialização do modelo sob condições de gravidade real. Esse comportamento é fisicamente consistente com a elevada suscetibilidade à liquefação estática esperada para materiais em estado muito fofo, indicando que o Cenário B pode já se encontrar próximo ou além da condição de instabilidade sob as tensões de serviço. As análises por equilíbrio limite, que não dependem de convergência incremental, foram mantidas para ambos os cenários e confirmam essa interpretação: o Cenário B apresenta FS pico inferior à unidade desde o nível d'água mais baixo analisado (NA I, y = 25 m).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES POR EQUILÍBRIO LIMITE

Conforme esperado, os resultados obtidos nas análises por equilíbrio limite indicaram redução progressiva do fator de segurança em função da elevação do nível freático no interior do reservatório.

A Figura 6 apresenta as superfícies críticas de ruptura obtidas para diferentes níveis d'água no maciço, evidenciando a influência direta da elevação da linha freática na estabilidade da estrutura. Observa-se uma redução progressiva do fator de segurança de pico (FS pico) com o aumento do nível d'água, variando de 1,38 para a condição com nível d'água em y = 25 m até 0,78 para o cenário com nível d'água em y = 77 m. As superfícies críticas estão representadas por diferentes cores, permitindo identificar pequenas diferenças na geometria das superfícies críticas obtidas, sendo predominantemente profundas, englobando todo talude de jusante e interceptando regiões profundas do reservatório, abaixo do NA onde ocorrem os materiais contráteis e saturados.

Destaca-se que a superfície crítica representada pela linha preta, correspondente ao nível d'água III (y = 51 m), apresenta FS pico igual a 1,03, valor considerado praticamente unitário e interpretado como a condição limite para a análise por EL. A partir desse cenário, os incrementos adicionais do nível d'água resultam em fatores de segurança inferiores a 1,0. As linhas azuis representam as diferentes posições da superfície freática adotadas nas análises de estabilidade.

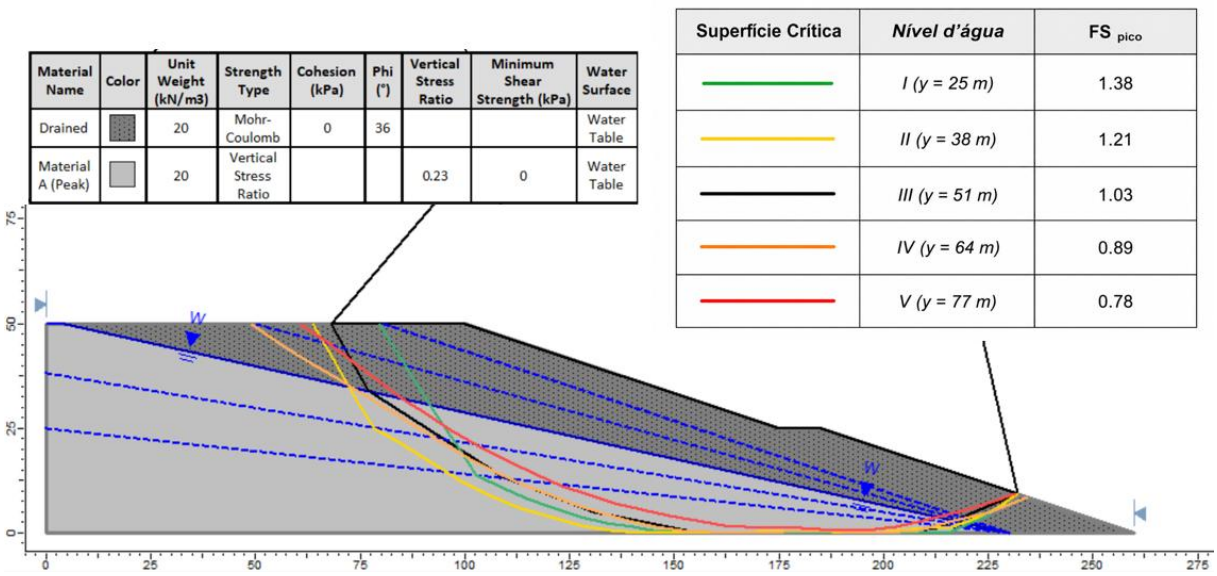


Figura 6 - Superfícies críticas de ruptura obtidas para diferentes níveis d'água, com indicação dos respectivos fatores de segurança de pico (FS pico)

Tabela 4 – Resultados de FS nas Análises por Equilíbrio Limite

Nível d'água	Cenário A		Cenário B	
	FS_{Pico}	$FS_{Residual}$	FS_{Pico}	$FS_{Residual}$
I *(y = 25 m)*	1,38	1,00	0,87	0,56
II *(y = 38 m)*	1,21	0,82	0,69	0,44
III *(y = 51 m)*	1,03	0,67	0,57	0,36
IV *(y = 64 m)*	0,89	0,58	0,49	0,31
V *(y = 77 m)*	0,78	0,51	0,43	0,27

3.2 RESULTADOS DAS ANÁLISES TENSÃO DEFORMAÇÃO COM AUMENTO DA GRAVIDADE

Os resultados das análises tensão-deformação com aumento de gravidade são apresentados a seguir para o Cenário A. A aplicação do GIM ao Cenário B foi inviabilizada por ausência de convergência numérica na condição inicial, conforme discutido na seção 2.5.

O estado de tensões se aproxima da linha de instabilidade para cada elevação de NA, causando uma ampliação de zonas com maior nível de mobilização das tensões cisalhantes e, consequentemente, mais próximas da condição de ruptura. A aproximação da linha de instabilidade significa redução da margem de resistência disponível, tornando os rejeitos mais suscetíveis a gatilhos de liquefação estática, especialmente sob alterações do estado de tensões por carregamentos, descarregamentos, elevação de poropressões ou perturbações externas.

Conforme será verificado nos resultados das análises apresentados nos itens subsequentes, a aproximação da linha de instabilidade causada pelo aumento de NA reduz o fator de segurança tanto por equilíbrio limite quanto por aumento de gravidade.

3.2.1 Análise do Mecanismo de Falha

A amplificação progressiva da gravidade promoveu aumento das tensões cisalhantes mobilizadas e geração de excesso de poropressão em regiões saturadas do reservatório. Como consequência, observou-se geração de poropressão e redução localizada das tensões efetivas e concentração progressiva de deformações cisalhantes.

O desenvolvimento das bandas de cisalhamento e excesso de poropressão ocorreu inicialmente em regiões localizadas próximas ao pé do talude e em zonas internas do reservatório submetidas a maiores relações η/Mθ. Com a progressão do carregamento, observou-se propagação das bandas de cisalhamento e liquefação, caracterizando mecanismos de ruptura progressiva. No final verifica-se uma grande cunha de ruptura com formato parecido com aquele obtido nas análises por EL, os deslocamentos causam o abatimento da crista do talude e estufamento do pé. Em cima da banda de cisalhamento verificam-se poropressões de até 600 kPa e a tendência de parâmetro de estado próximo a zero, indicando que o cisalhamento levou o material a atingir o estado crítico.

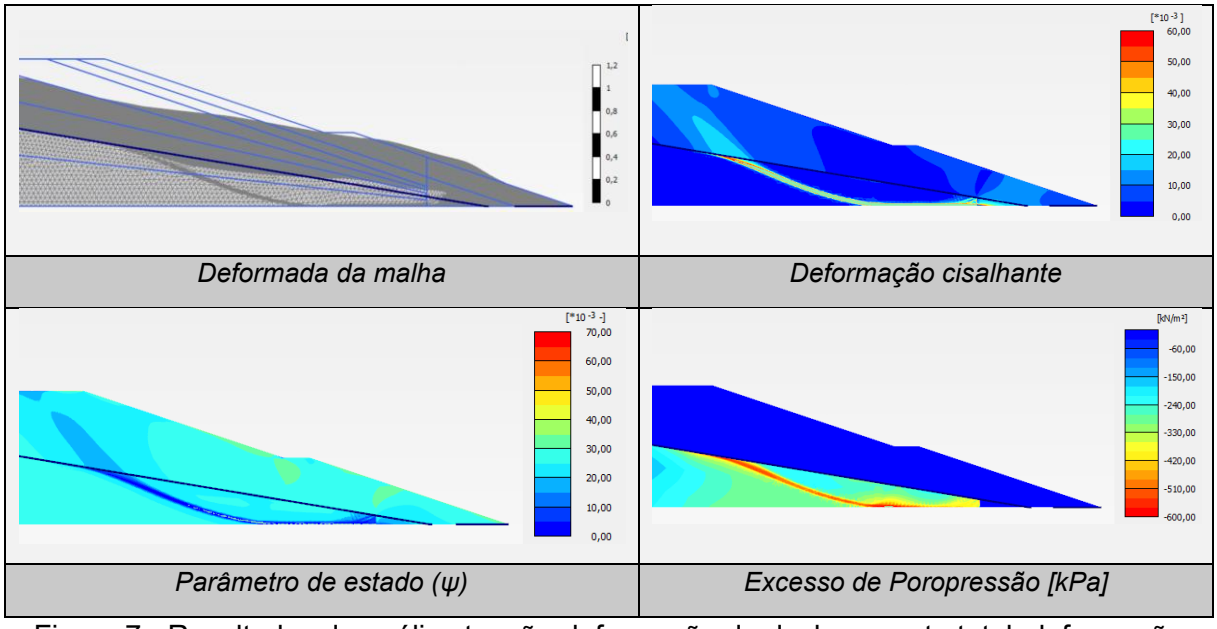


Figura 7 - Resultados da análise tensão-deformação de deslocamento total, deformação cisalhante, parâmetro de estado (ψ) e excesso de poropressão.

3.2.2 Trajetória de Tensões

As trajetórias de tensões no espaço *p'xq* estão apresentadas na Figura 8, as trajetórias obtidas indicaram desenvolvimento característico de comportamento frágil, com redução de resistência pós-pico. O desenvolvimento de poropressões causa aproximação da linha de instabilidade, que após ser ultrapassada observa-se o comportamento de *strain-softening* e consequentemente redução progressiva da

resistência do material. Esse comportamento foi particularmente evidente nos pontos C, D, E e F, posicionados próximos ao talude de jusante e às regiões associadas ao desenvolvimento inicial das bandas de cisalhamento identificadas nas análises tensão-deformação. Nesses pontos, observa-se comportamento pós-pico associado à perda progressiva de resistência, indicando suscetibilidade à liquefação estática.

Adicionalmente, observa-se que o valor de η_{IL} identificado nas trajetórias de tensões é correspondente a um modo de cisalhamento entre o cisalhamento simples ($\theta \approx 0°$) e deformação plana ($\theta \approx 21°$), condição na qual $M_\theta \approx 1{,}26$. Essa proximidade é fisicamente coerente com a geometria da banda de cisalhamento inicial que é aproximadamente horizontal e o tipo de análise que é 2D em deformação plana.

De forma distinta, ainda na Figura 8, os pontos A e B, localizados em regiões não saturadas, apresentaram comportamento predominantemente drenado, com trajetórias mais afastadas da linha de instabilidade e sem evidência significativa de geração de excessos de poropressão. Esse comportamento indica resposta mais estável do material, sem perda de resistência.

Os pontos G e H estão afastados da zona de cisalhamento principal, ocorrendo geração de poropressões, no entanto não o suficiente para que ocorra a extrapolação da linha de instabilidade, não ocorrendo perda de resistência não drenada.

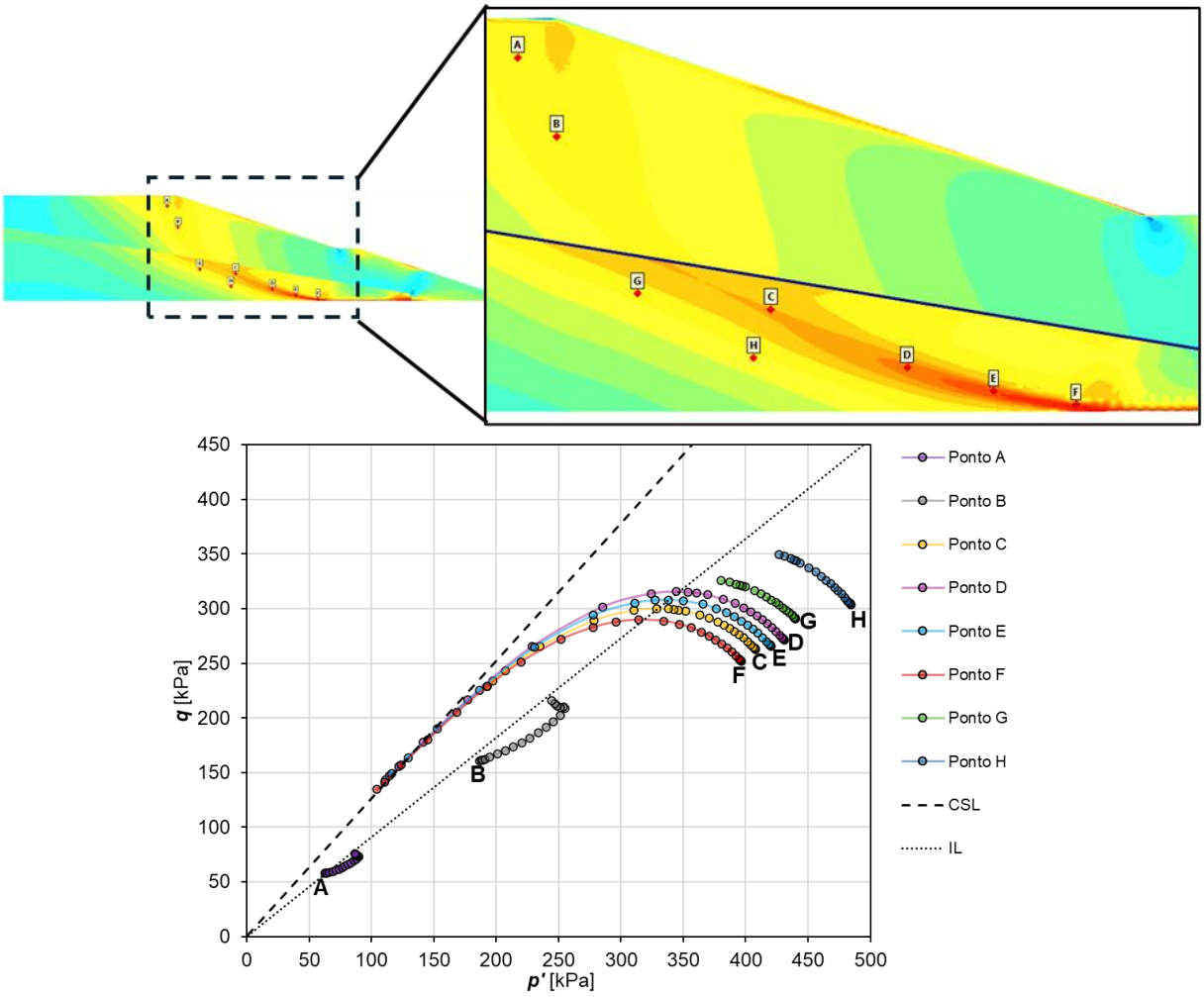


Figura 8 - Trajetória p'xq de 8 pontos durante carregamento estático (aumento da gravidade) para o NA II – η/Mθ

Os resultados evidenciam que a evolução do estado de tensões ocorre de forma progressiva no interior do modelo, indicando que os mecanismos de instabilidade não se desenvolvem simultaneamente em toda a massa de rejeitos. Em vez disso, observa-se concentração localizada de deformações e redistribuição gradual de tensões, comportamento compatível com processos de ruptura progressiva em materiais suscetíveis à liquefação estática. A mobilização da resistência na superfície de ruptura global pode variar desde valores de resistência drenada, não drenada de pico e não drenada residual.

3.2.3 *Evolução do Fator de Segurança*

As análises tensão-deformação utilizando aumento progressivo da gravidade também indicaram redução do fator de segurança em função da elevação do nível freático, conforme apresentado na Figura 9. Em comparação, são apresentados também os fatores de segurança de equilíbrio limite para cada condição analisada. Observa-se tendência consistente de redução progressiva da estabilidade à medida que ocorre a elevação da superfície freática.

Entretanto, diferentemente das análises por equilíbrio limite, os resultados obtidos pelo modelo tensão-deformação permaneceram superiores à unidade mesmo para as condições mais elevadas do NA, apresentando redução de valores próximos de 1,5 para valores ligeiramente superiores a 1,0 no cenário mais crítico (NA V). Em contrapartida, as análises por equilíbrio limite indicaram redução mais acentuada do fator de segurança, atingindo valores inferiores à unidade para os níveis freáticos mais elevados. A análise com resistência residual já apresenta FS próximo a unidade desde a elevação de NA mais baixa.

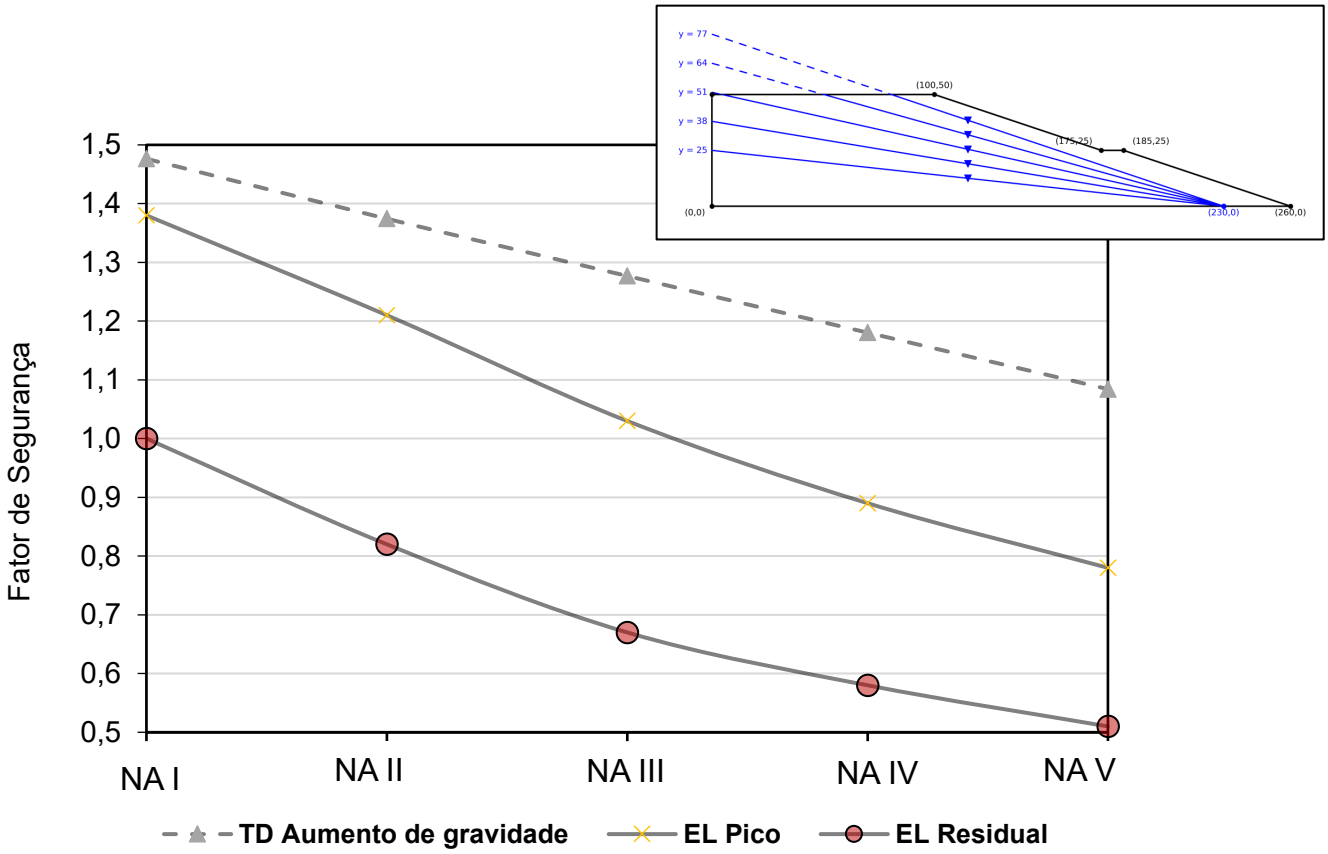


Figura 9 - Comparação entre os resultados de fator de segurança obtidos pelos modelos tensão-deformação e equilíbrio limite para diferentes cenários de nível d'água (NA I a NA V).

Embora os resultados das análises tensão-deformação por aumento de gravidade tenham obtido FS superior à unidade e não seja claro para qual NA a estrutura pode falhar, quanto mais elevado o NA é menor o aumento de gravidade necessário para instabilizar o modelo. Isso é indicativo de que a estrutura se torna vulnerável à liquefação sob gatilhos de menor intensidade.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma comparação entre análises por equilíbrio limite (EL) e análises tensão-deformação com aumento progressivo da gravidade (GIM) aplicadas à avaliação da estabilidade de uma barragem de rejeito suscetível à liquefação estática, com base no benchmark de Reid e Fourie (2023).

Os resultados demonstraram que ambas as abordagens capturam a tendência de redução progressiva da estabilidade com a elevação do nível freático. No entanto, diferenças significativas foram observadas quanto à magnitude dos fatores de segurança e à interpretação dos mecanismos de instabilidade. As análises por EL indicaram redução acentuada do FS, atingindo valores inferiores à unidade para os níveis freáticos mais elevados. As análises GIM, por sua vez, mantiveram FS superior à unidade em todos os cenários analisados, com redução progressiva de valores próximos a 1,5 até valores ligeiramente acima de 1,0 no cenário mais crítico. Ressalta-se, contudo, que os fatores obtidos pelas duas metodologias possuem naturezas distintas (razão entre esforços resistentes e atuantes no EL e multiplicador de carga gravitacional no GIM), de modo que a comparação apresentada deve ser interpretada como indicador de tendência do comportamento da estrutura, e não como equivalência numérica direta entre as grandezas.

Essa divergência reflete diferenças fundamentais entre as duas metodologias. O EL assume previamente a mobilização de resistência uniforme na superfície de ruptura, enquanto o GIM permite a redistribuição progressiva de tensões, a mobilização localizada de resistência e o desenvolvimento de bandas de cisalhamento compatíveis com mecanismos de ruptura progressiva. As trajetórias de tensões obtidas nas análises tensão-deformação evidenciaram comportamento de *strain-softening* em pontos próximos ao talude de jusante, associado à ultrapassagem da linha de instabilidade e à geração de excessos de poropressão, confirmando a suscetibilidade do material à liquefação estática.

Embora os resultados do GIM não indiquem ruptura iminente para os níveis freáticos analisados, a redução progressiva da capacidade resistente corrobora que elevações adicionais do NA tornam a estrutura progressivamente vulnerável a gatilhos de menor intensidade, como carregamentos ou descarregamentos de origem diversa. Nesse sentido, o GIM mostra-se uma ferramenta complementar valiosa, capaz de identificar regiões críticas e mecanismos de instabilidade que análises convencionais por EL não são capazes de representar adequadamente.

A ausência de convergência numérica na condição inicial do Cenário B é coerente com os resultados das análises por equilíbrio limite, que já indicam FS inferior à unidade para esse cenário mesmo no nível d'água mais baixo analisado. Essa convergência de resultados entre as duas metodologias reforça a interpretação de que estruturas com rejeitos em estado muito fofo podem já se encontrar em condição de instabilidade sob tensões de serviço, situação que tanto o EL quanto o GIM são capazes de sinalizar, ainda que por mecanismos distintos.

Conclui-se que a integração entre análises por EL e análises tensão-deformação com modelos constitutivos baseados no estado crítico, como o NorSand, representa uma abordagem mais robusta e informativa para a avaliação de estabilidade de barragens de rejeito suscetíveis à liquefação estática, contribuindo para uma interpretação mais realista dos potenciais mecanismos de ruptura e dos gatilhos associados.

5. PALAVRAS-CHAVE

Barragem de Rejeito, Liquefação, Estado Crítico, Aumento de Gravidade, Equilíbrio Limite.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] REID, D.; FOURIE, A. (2023) – “Development and outcomes of a tailings slope stability comparative design exercise”, *Canadian Geotechnical Journal*, v. 61, n. 8, p. 1683-1704, Canadá.

[2] JEFFERIES, M.; BEEN, K. (2016) – “Soil Liquefaction: A Critical State Approach”, CRC Press, Estados Unidos.

[3] LIU, H.; NAGULA, S.; JOSTAD, H. P.; PICIULLO, L.; NADIM, F. (2024) – “Considerations for using critical state soil mechanics based constitutive models for capturing static liquefaction failure of tailings dams”, *Computers and Geotechnics*, v. 167, Países Baixos.

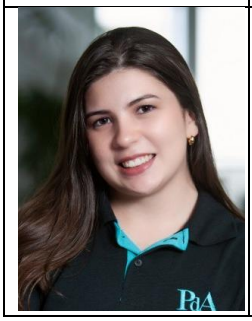
[4] RÓGENES, E.; PAES, I. T.; DELGADO, B. G.; BITTAR, R. J.; GOMES, A. D. S.; CIRONE, A.; RASMUSSEN, L. L. (2025) – “Assessing Static Liquefaction Triggers in Tailings Dams Using the Critical State Constitutive Models CASM and NorSand”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 49, n. 4, p. 1092–1112, Reino Unido.

[5] PLAXIS BV. (2024) – “PLAXIS 2D Material Models Manual – Versão 2024.2”, manual do usuário, Delft, Países Baixos.

[6] SHENG, D.; SLOAN, S. W.; YU, H. S. (2000) – “Aspects of finite element implementation of critical state models”, *Computational Mechanics*, v. 26, p. 185-196, Alemanha.



Ian PAES
Engenheiro Civil (UFPA) e Mestre em Geotecnia (PUC-Rio). Especialista em Geotecnia na Pimenta de Ávila Consultoria, com atuação em análises numéricas, comportamento de solos, monitoramento e análises de risco, com ênfase em liquefação de rejeitos e mecânica dos solos no estado crítico. Docente em pós-graduação e autor de publicações em congressos e revistas internacionais.



Sarah FAYER
Engenheira Civil (UFJF) e mestranda em Geotecnia (COPPE/UFRJ). Atua como Engenheira Geotécnica na Pimenta de Ávila Consultoria, em Belo Horizonte, desenvolvendo projetos relacionados a estudos de modelagem numérica aplicados a barragens de rejeitos.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.1
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

DIRETRIZES PARA ESTIMATIVA DE ONDAS GERADAS PELO VENTO EM RESERVATÓRIOS: COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS EMPÍRICAS PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS DE BARRAGENS

Leonardo de Souza LISBOA
Engenheiro Civil - G5 Engenharia

Rodolfo Rosendo de CARVALHO
Engenheiro Civil - G5 Engenharia

Joaquim Monteiro Garcez DUARTE
Engenheiro Civil - G5 Engenharia

RESUMO

A ação de ondas geradas pelo vento em reservatórios é relevante para a segurança de barragens, especialmente na verificação da borda livre e no dimensionamento de proteções marginais. Este trabalho compara metodologias empíricas para estimativa da altura significativa de onda: USBR, SMB/SPM, CEM e o método de Saville, McClendon e Cochran, este último adotado como referência mínima pela Eletrobrás no Brasil, aplicadas a um reservatório real em Goiás, utilizado para irrigação, cuja barragem apresentou processos erosivos no talude de montante. Foram avaliados os critérios de fetch retilíneo direcional, radial do USBR e efetivo de Saville, resultando em 1.027 m, 704 m e 420 m, respectivamente. As alturas significativas estimadas foram 0,44 m (USBR), 0,44 m (SMB/SPM), 0,53 m (CEM) e 0,45 m (Saville *et al*.). Com fetch comum, SMB/SPM e Saville *et al.* mostraram-se os mais conservadores, com alturas 27% e 30% superiores às demais. A sensibilidade indicou maior influência do vento que do fetch em todas as metodologias, e mostrou que a aplicação do método de Saville *et al.* às condições do estudo extrapola a faixa de validade original do parâmetro adimensional de fetch. Conclui-se que a aplicação dessas metodologias deve compatibilizar método, critério de fetch, velocidade de vento, incluindo sua representatividade climática regional, e profundidade, contribuindo para maior consistência técnica em diretrizes de projeto.

ABSTRACT

Wind-generated waves in reservoirs are a relevant factor in dam safety, particularly for freeboard assessment and upstream slope protection design. This study compares empirical methods for estimating significant wave height: USBR, the Sverdrup–Munk–Bretschneider (SMB) formulations in the Shore Protection Manual (SPM), the Coastal Engineering Manual (CEM) procedure, and the method developed by Saville, McClendon and Cochran, the latter adopted as a minimum reference criterion by Eletrobrás in Brazil, applied to an actual irrigation reservoir in Goiás, Brazil, where erosion was observed on the dam's upstream slope. Fetch criteria evaluated were straight-line directional, USBR radial, and Saville effective fetch, yielding 1,027 m, 704 m, and 420 m, respectively. Estimated significant wave heights were 0.44 m (USBR), 0.44 m (SMB/SPM), 0.53 m (CEM), and 0.45 m (Saville et al.). Using a common fetch, SMB/SPM and Saville et al. proved most conservative, with heights 27% and 30% higher than the other methods. Sensitivity analysis showed wind speed to be more influential than fetch across all methods, and found that applying the Saville et al. method to the study's short-fetch, high-wind conditions extrapolates its original fetch-parameter validity range. Results indicate that empirical wave methods should ensure consistency among method, fetch criterion, wind speed, including regional climatic representativeness, and water depth, supporting more consistent freeboard and slope-protection design.

1. INTRODUÇÃO

A ação de ondas geradas pelo vento em reservatórios constitui um dos principais mecanismos de erosão marginal, degradação de taludes e comprometimento de sistemas de proteção superficial em barragens e estruturas associadas, sendo reconhecida como fator relevante para a segurança de barragens e para o dimensionamento da borda livre [1]. Em reservatórios de médio e grande porte, a interação entre velocidade do vento, fetch efetivo, profundidade do corpo d'água e geometria do reservatório, controla a geração e a propagação das ondas, influenciando diretamente o dimensionamento de proteções marginais, como enrocamentos e revestimentos em solo-cimento. A adequada determinação das características das ondas representa, assim, uma etapa fundamental em estudos hidráulicos e geotécnicos aplicados a reservatórios [2,3].

A avaliação de ondas em reservatórios pode ser realizada por modelos numéricos ou por metodologias empíricas. Modelos espectrais, como o SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), simulam a geração e a propagação de ondas a partir de características batimétricas e campos de vento variáveis [4], mas demandam maior disponibilidade de dados, calibração e esforço computacional, o que frequentemente limita seu uso em estudos preliminares e projetos correntes de engenharia. Por isso, métodos empíricos permanecem amplamente empregados na prática profissional, devido à simplicidade de aplicação, rapidez de processamento e adequação a avaliações de projeto.

Entre os métodos empíricos mais utilizados destacam-se as formulações de *Sverdrup–Munk–Bretschneider*, consolidadas no *Shore Protection Manual* (SPM) [2] e atualizadas no Coastal Engineering Manual (CEM) [6]; as diretrizes do *U.S. Bureau of Reclamation* (USBR) [3,10]; e o procedimento de Saville, McClendon e Cochran, calibrado a partir de dados de campo em reservatórios continentais [7,8]. No Brasil, esse último procedimento é adotado como critério mínimo de referência para dimensionamento de borda livre em usinas hidrelétricas pela Eletrobrás [9], o que reforça sua relevância prática para aplicações em barragens continentais no país. Essas metodologias tratam de forma distinta o crescimento das ondas em função do fetch, da profundidade e do vento, podendo gerar diferenças nas estimativas de altura e período de onda.

Apesar de sua ampla utilização em projetos de barragens, ainda há pouca padronização quanto aos critérios de seleção e aplicação de cada procedimento, especialmente em reservatórios continentais sujeitos a crescimento limitado por fetch e profundidade, o que pode conduzir a distintos níveis de conservadorismo no dimensionamento de borda livre e de proteções marginais.

Diante desse contexto, o presente trabalho compara quatro metodologias empíricas para estimativa de ondas geradas pelo vento em reservatórios, USBR, SMB/SPM, CEM e Saville *et al.*, discutindo suas etapas de cálculo, limitações e sensibilidade às variáveis de entrada, com ênfase na velocidade do vento, no fetch e na profundidade. A partir dessa análise, propõem-se diretrizes práticas para aplicação dessas metodologias em projetos de engenharia de barragens.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

Para aplicação e comparação das metodologias empíricas de estimativa de ondas, foi adotado como estudo de caso um reservatório localizado no estado de Goiás, destinado à acumulação de água para irrigação de lavouras. A escolha decorre de sua aplicação prática em um estudo de engenharia voltado à avaliação da ação de ondas sobre o talude de montante da barragem, onde foram observados processos erosivos que demandaram o dimensionamento de proteção superficial. A adoção de um reservatório real permitiu avaliar as metodologias em uma condição representativa de projeto, considerando a geometria efetiva do reservatório e a incidência direta das ondas sobre a estrutura.

A Figura 1 apresenta o contorno do reservatório, com indicação da barragem e do ponto de análise, definido na região central da estrutura para avaliação da incidência das ondas e comparação dos fetches associados às direções de vento consideradas.

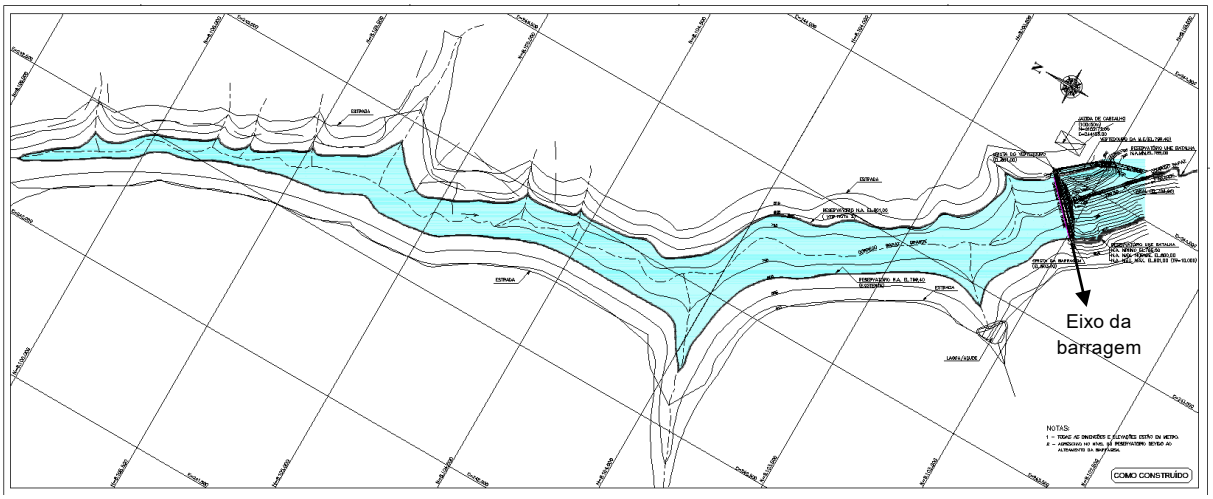


Figura 1 –Reservatório em estudo com indicação da barragem.

As características técnicas do reservatório e da barragem pertinentes aos cálculos subsequentes são apresentadas na Tabela 1, incluindo os parâmetros utilizados para caracterização geométrica da análise, como área superficial, volume armazenado e profundidade representativa. Para estimativa das ondas, a geometria do reservatório foi avaliada a partir do espelho d'água correspondente à condição de interesse de projeto, considerando o ponto de análise definido na região central da barragem, a partir do qual foram traçadas as direções de vento e os respectivos fetches, conforme os critérios descritos na seção seguinte.

Tabela 1 – Características técnicas da barragem e do reservatório associado.

Característica	Valor	Unidade
Comprimento máximo da barragem	269,80	m
Volume do reservatório	3.750.074	m³
Área do reservatório	660.600	m²
Profundidade média	5,70	m

2.2 Determinação do Fetch

A determinação do fetch foi realizada a partir do contorno do reservatório correspondente ao nível d'água normal, considerando o ponto de referência localizado na região central da barragem. Em razão da geometria irregular de reservatórios continentais, foram avaliados três critérios de representação do comprimento livre de água disponível para a ação do vento: o fetch retilíneo direcional, o fetch médio radial e o fetch efetivo ponderado pelo método de Saville.

O fetch retilíneo direcional foi determinado pela distância medida sobre a superfície livre entre o ponto de análise e a margem oposta do reservatório, adotando-se, neste estudo, a direção perpendicular ao eixo da barragem como referência para incidência do vento. Trata-se do procedimento mais simples de caracterização do fetch e apresenta aplicação direta em avaliações preliminares. Entretanto, em reservatórios com largura limitada, margens irregulares ou braços laterais, esse critério pode não representar adequadamente a extensão efetivamente disponível para o crescimento das ondas, por desconsiderar a distribuição angular da ação do vento e a influência das margens laterais [7,8].

Também foi avaliado o procedimento radial, no qual são traçadas nove radiais a partir do ponto de interesse, espaçadas de 3° e centradas na direção principal de incidência. Cada radial é prolongada até sua primeira interseção com a margem oposta do reservatório, sendo o fetch representativo obtido pela média aritmética dos comprimentos medidos [10]. Assim, para cada direção analisada, o fetch médio radial foi calculado pela equação 1.

$$F_9 = \frac{1}{9}\sum_{i=1}^{9} F_i \tag{1}$$

em que F_9é o fetch médio radial e F_ié o comprimento da i-ésima radial.

Para as formulações associadas ao método Sverdrup–Munk–Bretschneider e suas aplicações em águas interiores, foi considerado o método de fetch efetivo proposto por Saville, desenvolvido para representar o efeito da largura limitada do corpo d'água sobre a geração das ondas [7,8]. Nesse procedimento, são traçadas radiais em torno da direção principal do vento, estendidas até a primeira interseção com a margem do reservatório, e seus comprimentos são ponderados em função do ângulo formado com a direção central.

No presente estudo, o método de Saville foi aplicado considerando um setor angular de 90°, correspondente a 45° para cada lado da direção principal do vento. A discretização foi realizada por 15 radiais, espaçadas a cada 6°, cobrindo ângulos de 0° a 42° em relação à radial central em ambos os sentidos — procedimento clássico proposto pelos autores originais do método, no qual cada radial representa o valor médio de um setor de 6°, de forma que a radial em 42° já corresponde à cobertura completa do setor de 45° [7,8]. O fetch efetivo de Saville foi calculado pela Equação 2.

$$F_e = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_i \cos^2 \alpha_i}{\sum_{i=1}^{n} \cos \alpha_i} \tag{2}$$

em que F_eé o fetch efetivo; F_ié o comprimento da radial i, medido até a margem oposta do reservatório; α_ié o ângulo entre a radial ie a direção principal do vento; e né o número total de radiais consideradas.

A Figura 2 apresenta a aplicação dos critérios de determinação do fetch no reservatório analisado, contemplando o procedimento radial do USBR e o fetch efetivo

pelo método de Saville. Em ambas as representações, a linha em vermelho indica o fetch retilíneo direcional, traçado a partir do ponto de análise localizado na região central da barragem e orientado perpendicularmente ao eixo do barramento. Essa linha corresponde à radial central adotada nos dois procedimentos, servindo como referência comum para comparação entre os diferentes critérios de determinação do fetch. Os valores obtidos foram posteriormente consolidados com as demais variáveis de entrada, permitindo associar cada metodologia empírica ao critério de fetch mais compatível com sua formulação ou diretriz de referência.

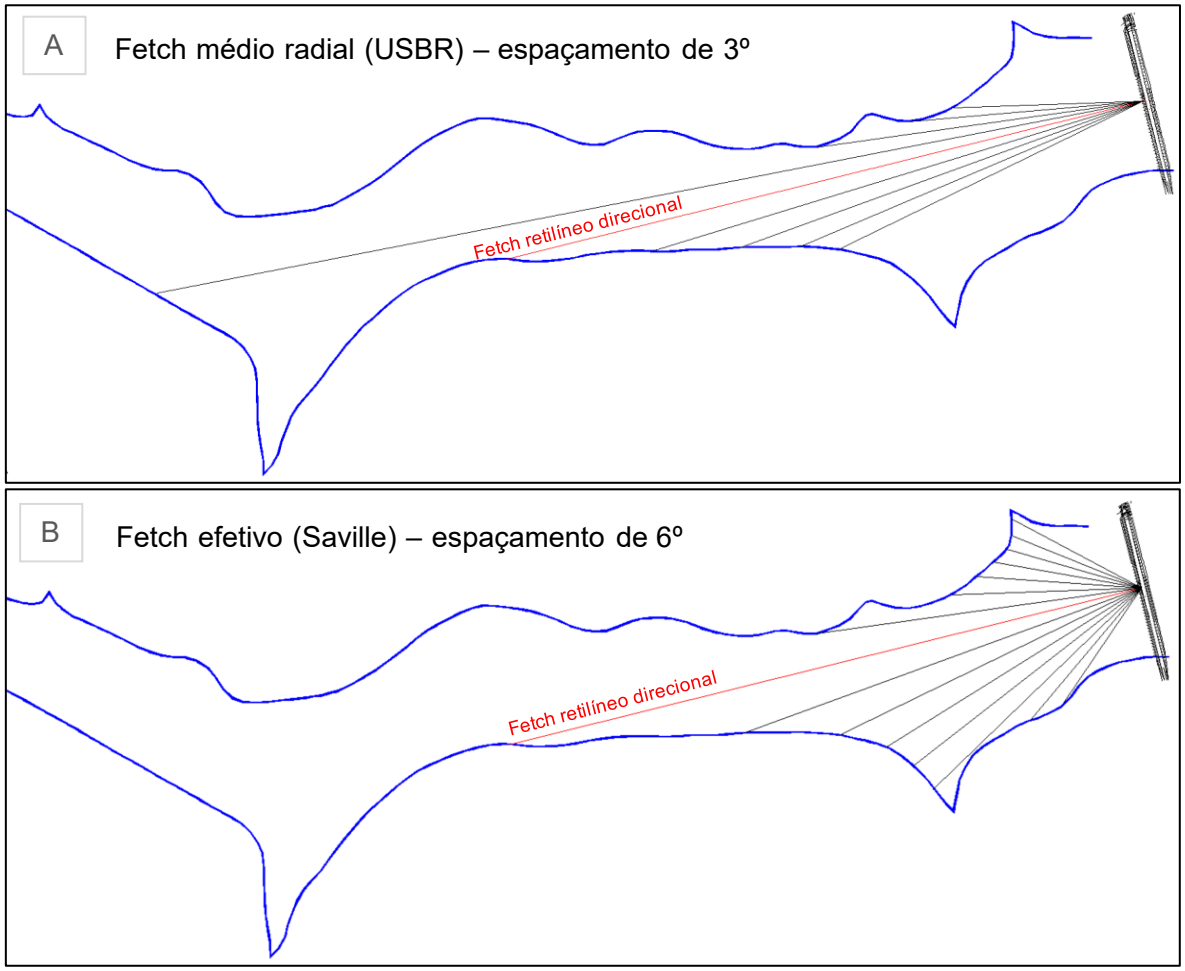


Figura 2 –Métodos de determinação do fetch no reservatório analisado: (A) fetch médio radial do USBR; (B) fetch efetivo pelo método de Saville.

Além dos procedimentos adotados neste estudo, existem outras formas de caracterização do fetch em corpos d'água interiores, incluindo aproximações baseadas na área superficial, em geometrias equivalentes e em relações entre área e perímetro do reservatório. Embora simples, esses métodos podem apresentar limitações em reservatórios sinuosos ou dendríticos [11]. Também há abordagens automatizadas para geração de campos bidimensionais de fetch e métodos direcionais ou espectrais aplicados a fetches restritos [11,12,13,14]. Neste trabalho, foram priorizados os procedimentos mais consagrados em manuais e diretrizes de engenharia de barragens, por sua maior aderência à prática profissional e por permitirem comparação direta entre as metodologias empíricas avaliadas.

2.3 Metodologias Empíricas Avaliadas

As metodologias empíricas avaliadas neste trabalho foram selecionadas por sua recorrência em manuais técnicos de engenharia e por sua aplicação direta em estudos de barragens, borda livre e proteção do talude de montante. Foram consideradas as diretrizes do *U.S. Bureau of Reclamation* (USBR) [3,10], as formulações de *Sverdrup–Munk–Bretschneider* consolidadas no *Shore Protection Manual* (SPM) [2], o procedimento apresentado no *Coastal Engineering Manual* (CEM) [5] e o método desenvolvido por Saville, *et al.* [8], calibrado a partir de observações de campo em reservatórios continentais e adotado como referência mínima pela Eletrobrás [9].

O fetch efetivo proposto por Saville [7] foi adotado tanto na aplicação do método SMB/SPM quanto na do método de Saville *at al.*. Essa escolha não representa uma combinação arbitrária entre metodologias: o fetch efetivo de Saville foi desenvolvido especificamente para adaptar as formulações do SMB a corpos d'água interiores de largura restrita, sendo reconhecido na literatura de engenharia costeira e de reservatórios como parte constituinte da própria formulação SMB para fetches restritos, por vezes referida como método "Saville/SMB". Adicionalmente, esse mesmo critério de fetch foi utilizado pelos autores na calibração original da equação de altura significativa de onda apresentada em seu método [8], de modo que sua aplicação a ambas as formulações preserva a consistência entre o fetch adotado e a base empírica de cada equação.

Outras formulações empíricas e semiempíricas também podem ser utilizadas para previsão de ondas geradas pelo vento, incluindo métodos derivados de JONSWAP, Donelan, Wilson, Carter e Young & Verhagen. No entanto, essas abordagens foram mantidas fora da comparação principal por estarem mais associadas a aplicações específicas, como estudos de lagos rasos, reservatórios pequenos e condições particulares de profundidade finita.

Embora as metodologias selecionadas permitam estimar diferentes variáveis associadas ao campo de ondas, como período, comprimento de onda, run-up e componentes de borda livre, a comparação desenvolvida neste artigo concentrou-se na altura significativa de onda, por se tratar da variável comum às metodologias avaliadas e diretamente relacionada à solicitação hidráulica incidente sobre o talude de montante. As demais formulações podem ser consultadas nos manuais de referência de cada metodologia [2,5,10].

A aplicação principal de cada método foi realizada com o critério de fetch mais compatível com sua formulação ou diretriz de referência. Adicionalmente, foi conduzida uma análise de sensibilidade considerando a variação dos principais parâmetros de entrada, velocidade do vento, fetch e profundidade representativa, quando aplicável, com o objetivo de avaliar a influência relativa dessas variáveis sobre a estimativa da altura significativa de onda. A Figura 3 apresenta o fluxograma geral adotado para aplicação comparativa das metodologias empíricas avaliadas.

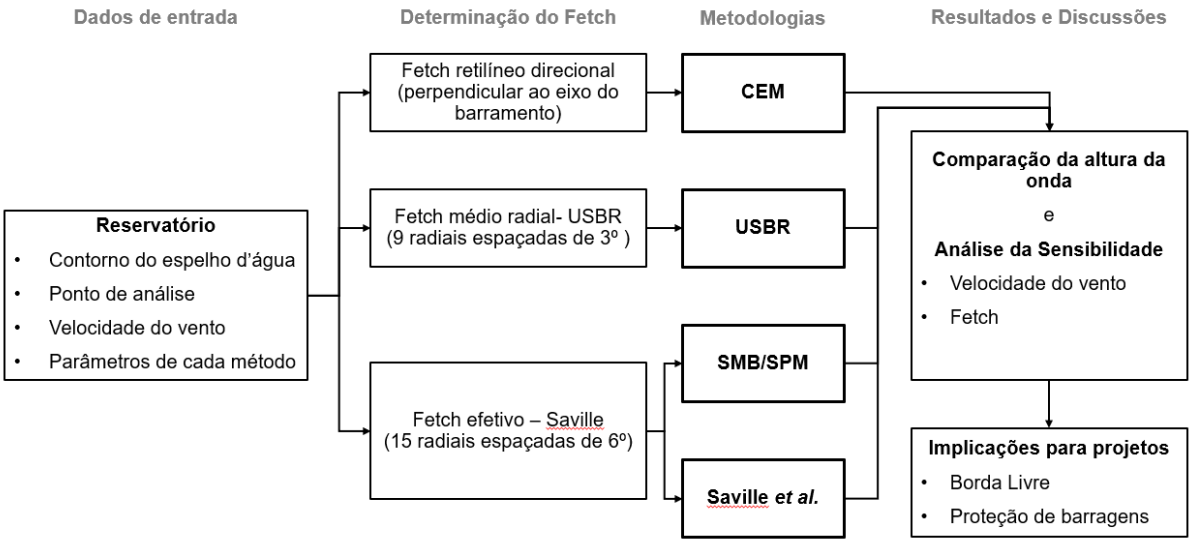


Figura 3 – Fluxograma geral de aplicação das metodologias empíricas avaliadas para estimativa de ondas geradas pelo vento em reservatórios.

2.3.1 Método USBR

O método do *U.S. Bureau of Reclamation* (USBR) é tradicionalmente utilizado em estudos de barragens, especialmente na verificação de borda livre e no dimensionamento de proteções de taludes de montante. Sua formulação relaciona a altura significativa de onda à velocidade do vento sobre o reservatório e ao fetch disponível para geração das ondas [3,10], conforme indicado na Equação 3.

$$H_s = 0{,}0245\, F^{1/2}\, V_{MPH}\, (1{,}1 + 0{,}0156 V_{MPH})^{1/2} \quad (3)$$

em que H_sé a altura significativa de onda, em pés; Fé o fetch, em milhas; e V_{MPH}é a velocidade do vento sobre a água, em milhas por hora.

No presente estudo, a equação foi aplicada em suas unidades originais, conforme recomendação da metodologia, com posterior conversão dos resultados para o Sistema Internacional. Para aplicação do método USBR, foi adotado o fetch médio radial obtido a partir das nove radiais espaçadas de 3°, conforme descrito anteriormente. Esse critério foi mantido por ser o procedimento indicado nas diretrizes recentes do USBR para análise de borda livre em barragens [10].

2.3.2 Método Sverdrup–Munk–Bretschneider / Shore Protection Manual

As formulações de *Sverdrup–Munk–Bretschneider* (SMB), consolidadas no *Shore Protection Manual* (SPM), constituem uma das bases clássicas para previsão empírica de ondas geradas pelo vento [2]. O método utiliza relações adimensionais entre altura significativa de onda, velocidade do vento, fetch e profundidade, sendo aplicável a condições de crescimento limitado por fetch e por profundidade.

No SPM, a velocidade do vento é inicialmente convertida para o fator de tensão do vento, U_A, que representa a relação não linear entre a velocidade atmosférica e a transferência de energia para a superfície livre. Após as correções pertinentes à altura

de medição, localização e estabilidade atmosférica, esse fator pode ser estimado pela equação 4.

$$U_A = 0{,}71U^{1{,}23} \tag{4}$$

em que U_A é o fator de tensão do vento, em m/s, e U é a velocidade do vento corrigida, em m/s. Para unidades inglesas, o SPM também apresenta formulação equivalente com coeficiente próprio.

Para condições de profundidade finita, a altura significativa de onda é calculada pela relação adimensional apresentada na equação 5.

$$\frac{gH_S}{U_A^2} = 0{,}283\tanh\left[0{,}530\left(\frac{gd}{U_A^2}\right)^{3/4}\right]\tanh\left\{\frac{0{,}00565\left(\frac{gF}{U_A^2}\right)^{1/2}}{\tanh\left[0{,}530\left(\frac{gd}{U_A^2}\right)^{3/4}\right]}\right\} \tag{5}$$

em que g é a aceleração da gravidade; H_S é a altura significativa ou espectral de onda; d é a profundidade representativa do reservatório; e F é o fetch.

No presente estudo, o método SMB/SPM foi aplicado utilizando o fetch efetivo determinado pelo procedimento de Saville, por ser este o critério classicamente associado à representação da largura limitada do corpo d'água em aplicações de ondas geradas pelo vento em reservatórios interiores [7,8]. A profundidade representativa foi inserida diretamente na formulação, permitindo considerar o efeito de limitação por lâmina d'água na estimativa da altura de onda. A velocidade do vento foi previamente convertida para o fator de tensão U_A, conforme formulação do SPM [2].

2.3.3 Método Coastal Engineering Manual

O *Coastal Engineering Manual* (CEM) representa a atualização e consolidação do *U.S. Army Corps of Engineers* para procedimentos de engenharia costeira e hidrodinâmica, incluindo métodos simplificados para previsão de ondas geradas pelo vento. Diferentemente do SPM, que utiliza o fator de tensão U_A, o CEM organiza a formulação com base na velocidade de atrito do vento, u_*, obtida a partir da velocidade do vento a 10 m de altura sobre a superfície da água [5].

Inicialmente, calcula-se o coeficiente de arrasto C_D conforme apresentado na equação 6, então a velocidade de atrito, determinada na equação 7, e em seguida o fetch adimensional na equação 8.

$$C_D = 0{,}001(1{,}1 + 0{,}035U_{10}) \tag{6}$$

$$u_* = U_{10}\sqrt{C_D} \tag{7}$$

$$\hat{X} = \frac{gX}{u_*^2} \tag{8}$$

em que C_D é o coeficiente de arrasto adimensional e U_{10} é a velocidade do vento a 10 m de altura, em m/s. $\hat{X}$ é o fetch adimensional e X é o fetch adotado.

Para condição limitada por fetch, a altura significativa espectral adimensional é estimada pela equação 9.

$$\hat{H} = 0{,}0413\hat{X}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

sendo a altura significativa espectral calculada pela equação 10.

$$H_{m0} = \frac{\hat{H}u_*^2}{g} \quad (10)$$

em que H_{m0}é a altura significativa espectral de onda. Para fins de comparação com as demais metodologias, H_{m0} foi tratado como equivalente à altura significativa de onda.

No presente estudo, o CEM foi aplicado utilizando o fetch retilíneo direcional como cenário base, em conformidade com o procedimento usual de previsão de ondas limitadas por fetch apresentado no manual [5]. A influência da adoção de outros critérios de fetch foi avaliada posteriormente na análise de sensibilidade, de modo a verificar o efeito da caracterização geométrica do reservatório sobre os resultados.

2.3.4 Método de Saville, McCendon e Cochran

O método desenvolvido por Saville *et al.* foi calibrado diretamente a partir de observações de campo de vento e onda em reservatórios reais (Fort Peck e Lake Texoma), diferentemente das demais formulações avaliadas, que têm origem em dados predominantemente oceânicos posteriormente adaptados a corpos d'água interiores [8]. Sua formulação relaciona a altura significativa de onda ao fetch e à velocidade do vento por meio de uma equação adimensional, conforme indicado na Equação 11.

$$\frac{gH_S}{U^2} = 0{,}0026\left(\frac{gF}{U^2}\right)^{0{,}47} \quad (11)$$

em que H_Sé a altura significativa de onda, em pés; Fé o fetch, em milhas; Ué a velocidade do vento, em milhas por hora, medida a aproximadamente 7,5 a 9 m de altura sobre a superfície da água; e gé a aceleração da gravidade. A equação foi aplicada nas unidades originais indicadas, com posterior conversão dos resultados para o Sistema Internacional, de forma análoga ao procedimento adotado para o método USBR.

A aplicação da Equação 11 deve ser precedida da verificação do parâmetro adimensional de fetch, obtido pela multiplicação do fetch pela aceleração da gravidade e divisão pelo quadrado da velocidade do vento (gF/U^2, com g, F e Uem unidades consistentes). Os autores recomendam que esse parâmetro esteja compreendido entre 10 e 4.000 para que a formulação seja aplicada dentro da faixa de dados utilizada em sua calibração [8].

2.4 Análise da sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada com o objetivo de avaliar a influência relativa da velocidade do vento e do fetch sobre a estimativa da altura significativa de onda. Para isso, adotou-se como referência o cenário base de cada metodologia, correspondente à aplicação principal dos métodos USBR, SMB/SPM, CEM e Saville *et al*.

A partir desse cenário, foram realizadas variações independentes da velocidade do vento e do fetch, mantendo-se constantes as demais variáveis de entrada de cada método. Para a análise da velocidade do vento, foram considerados valores entre 50 km/h e 120 km/h, mantendo-se fixo o fetch de aplicação principal de cada metodologia. Para a análise do fetch, foram considerados fatores multiplicativos entre 0,50 e 2,00 em relação ao fetch de referência de cada método, mantendo-se fixa a velocidade do vento de 100 km/h.

Para o método de Saville *et al.*, cada cenário da análise de sensibilidade foi adicionalmente verificado quanto ao atendimento da faixa de validade do parâmetro adimensional gF/U^2(Seção 2.3.4), uma vez que a variação da velocidade e do fetch altera diretamente esse parâmetro.

Os resultados foram avaliados de forma normalizada, dividindo-se a altura calculada em cada cenário pela altura obtida no cenário base da respectiva metodologia. Dessa forma, valores iguais a 1,0 representam a condição de referência, enquanto valores superiores ou inferiores a 1,0 indicam, respectivamente, aumento ou redução relativa da altura significativa de onda. Essa abordagem permitiu comparar a sensibilidade das metodologias às variáveis analisadas, independentemente das diferenças absolutas de altura entre os métodos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comparação dos critérios de determinação do Fetch

A aplicação dos diferentes critérios de determinação do fetch no ponto de análise localizado na região central da barragem resultou em valores significativamente distintos. O fetch retilíneo direcional foi igual a 1.027 m, enquanto o procedimento radial do USBR resultou em 704 m e o fetch efetivo de Saville em 420 m. Assim, o fetch obtido pelo USBR correspondeu a aproximadamente 68,5% do valor retilíneo, enquanto o método de Saville resultou em 40,9% desse mesmo valor.

A diferença observada decorre da forma como cada critério representa a geometria do reservatório. O fetch retilíneo considera apenas a distância livre na direção central de incidência do vento, sem incorporar a influência das margens laterais. Por isso, tende a representar uma condição mais direta e, neste caso, mais elevada. O procedimento do USBR, por sua vez, utiliza a média de nove radiais próximas à direção principal, o que reduz o valor final quando as radiais laterais interceptam margens em menores distâncias. Já o método de Saville considera um setor angular mais amplo, de 90°, ponderando as radiais em torno da direção principal do vento, o que torna o resultado mais sensível à largura efetiva e à irregularidade geométrica do reservatório.

Dessa forma, a relação observada neste estudo foi $F_{retilíneo} > F_{USBR} > F_{Saville}$. Essa hierarquia, entretanto, não deve ser interpretada como regra geral, pois depende diretamente da geometria do reservatório, da posição do ponto analisado e da direção considerada para incidência do vento. Em reservatórios mais largos e regulares, os valores obtidos pelos diferentes critérios podem ser mais próximos; por outro lado, em

reservatórios estreitos, sinuosos ou com margens irregulares, a diferença tende a ser mais expressiva.

No caso analisado, os resultados indicam que, embora exista um comprimento livre de água de 1.027 m na direção central, esse comprimento não se mantém lateralmente no entorno da direção de incidência. A redução para 704 m pelo procedimento do USBR e para 420 m pelo método de Saville evidencia que a geometria do reservatório limita o crescimento efetivo das ondas. Assim, a caracterização do fetch constitui uma etapa sensível da análise, capaz de influenciar diretamente as estimativas de altura e período de onda e, consequentemente, o nível de conservadorismo adotado no dimensionamento de borda livre e de proteções marginais.

3.2 Comparação entre Metodologias

A Tabela 2 apresenta a comparação das alturas significativas de onda estimadas pelas metodologias avaliadas, considerando velocidade do vento de 100 km/h. Na aplicação principal, cada método foi utilizado com o critério de fetch mais compatível com sua formulação ou diretriz de referência: fetch médio radial para o USBR, fetch efetivo de Saville para o SMB/SPM e para o método de Saville *et al.*, e fetch retilíneo direcional para o CEM. Adicionalmente, foi incluído um cenário de controle com fetch comum de 704 m, correspondente ao valor obtido pelo procedimento radial do USBR, com o objetivo de isolar, de forma estritamente comparativa, o efeito das formulações empíricas em relação à influência da caracterização geométrica do fetch, não se tratando de uma combinação metodológica recomendada para aplicação prática, na qual cada método deve ser utilizado com seu critério de fetch de referência, conforme discutido na Seção 4.

Tabela 2 – Comparação das alturas significativas de onda pelas metodologias selecionadas.

Metodologia	Critério de fetch	Fetch	Profundidade	Altura da onda	Altura da onda (fetch comum)
USBR	Médio radial (USBR)	704 m	Não aplicada diretamente	0,44 m	0,44 m
SMB/SPM	Efetivo (Saville)	420 m	5,70 m	0,44 m	0,56 m
CEM	Retilíneo direcional	1.027 m	Verificação por limitação	0,53 m	0,44 m
Saville *et al.*	Efetivo (Saville)	420 m	Verificação por limitação	0,45 m	0,57 m

Os resultados da aplicação principal indicaram alturas significativas de onda relativamente próximas, variando entre 0,44 m e 0,53 m. O maior valor foi obtido pelo CEM, com altura de 0,53 m, seguido pelo método de Saville et al., com 0,45 m, e pelo USBR e SMB/SPM, ambos com 0,44 m. Em termos percentuais, o resultado do CEM foi aproximadamente 19% superior ao de Saville et al., cerca de 21% superior ao do USBR e 22% superior ao do SMB/SPM, enquanto USBR e SMB/SPM resultaram praticamente equivalentes entre si, com diferença inferior a 2%.

A comparação mostra que o maior fetch não resultou em aumento proporcional da altura significativa de onda: embora o CEM tenha utilizado o maior fetch (1.027 m), sua altura estimada foi apenas moderadamente superior às demais, enquanto o SMB/SPM e o método de Saville et al., mesmo com o menor fetch (420 m), resultaram em alturas semelhantes às do USBR (704 m). Esse comportamento decorre do caráter sublinear das formulações empíricas em relação ao fetch, além das diferenças na forma como cada método trata a velocidade do vento e, quando aplicável, a profundidade.

No cenário de controle, com fetch comum de 704 m para todos os métodos, USBR e CEM resultaram em alturas praticamente equivalentes (0,44 m), enquanto SMB/SPM e Saville *et al.* apresentaram alturas superiores (0,56 m e 0,57 m, respectivamente), cerca de 27% e 30% maiores que USBR/CEM. Isolada a diferença associada ao fetch, essas duas formulações se mostraram as mais conservadoras, resultado coerente com sua origem comum a partir da mesma relação entre altura de onda e o parâmetro adimensional de fetch em corpos d'água interiores restritos. Esse resultado é compatível com avaliações posteriores das formulações do SPM, nas quais se observa que o método pode apresentar estimativas mais conservadoras em determinadas condições, especialmente em função do tratamento dado à velocidade do vento [15].

Cabe destacar que, para a velocidade de vento adotada (100 km/h), o parâmetro adimensional gF/U^2do método de Saville et al. (Seção 2.3.4) resultou em 5,34 na aplicação principal e em 8,95 no cenário de controle, ambos abaixo do limite inferior da faixa de calibração original do método (10 a 4.000), configurando uma extrapolação cujo efeito sobre a precisão da estimativa não pode ser quantificado com os dados disponíveis. Optou-se por manter a velocidade padronizada nas demais metodologias, por se tratar de premissa de projeto definida por critério de segurança, e não de parâmetro ajustável à faixa de validade de uma formulação específica; ainda assim, verificou-se que uma velocidade de 73 km/h, limite necessário para atender a faixa validada, resultaria em altura inferior à obtida com 100 km/h, de modo que a premissa adotada configura a estimativa mais conservadora entre as duas condições.

Do ponto de vista prático, USBR e CEM apresentam aplicação mais direta (equações fechadas com poucas etapas intermediárias, ainda que o CEM exija o cálculo de coeficiente de arrasto e velocidade de atrito). O SMB/SPM é o mais trabalhoso dos quatro, por envolver o fator de tensão do vento, o fetch efetivo de Saville e a profundidade representativa, o que em contrapartida permite representar explicitamente a limitação por profundidade. O método de Saville et al., apesar de estruturalmente simples, requer verificação adicional da faixa de validade do parâmetro de fetch, o que pode restringir sua aplicação em reservatórios de fetch curto associados a ventos de projeto elevados.

Em síntese, as metodologias produziram alturas da mesma ordem de grandeza para o reservatório analisado, mas com diferenças suficientes para influenciar decisões de projeto relacionadas à borda livre e à proteção do talude de montante.

3.3 Sensibilidade das Variáveis

A Figura 4 apresenta a resposta normalizada da altura significativa de onda à variação da velocidade do vento e do fetch. Em ambas as análises, os resultados foram apresentados em relação ao cenário base de cada metodologia, de modo que $H/H_0 = 1{,}0$ representa a altura calculada na aplicação principal de cada método.

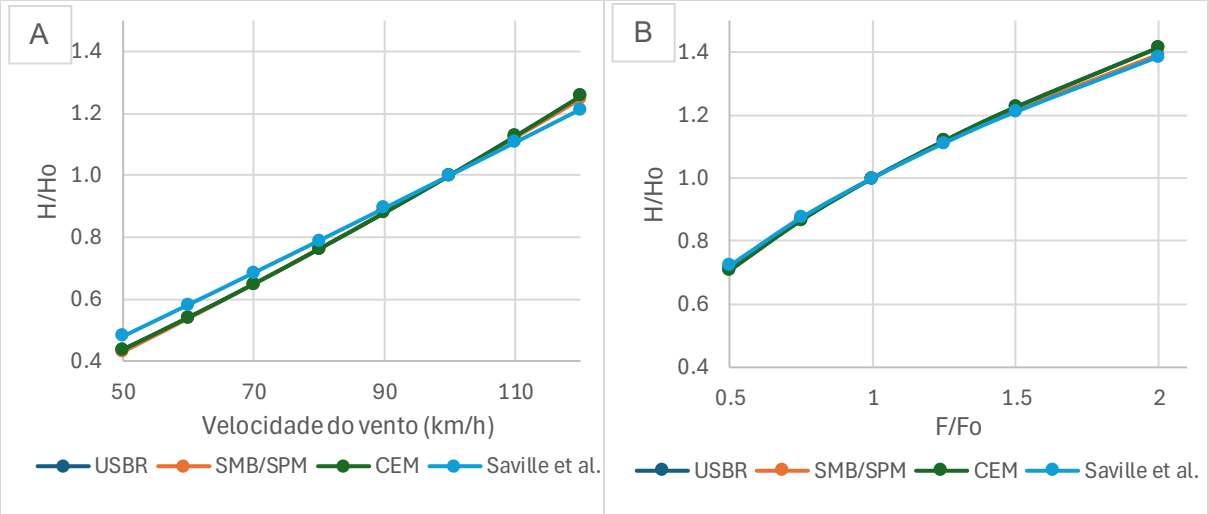


Figura 4 – Sensibilidade normalizada da altura significativa de onda à variação da (A) velocidade do vento e do (B) fetch.

A variação da velocidade do vento produziu crescimento mais acentuado da altura significativa de onda em todas as metodologias. Para o intervalo analisado, as curvas dos métodos USBR, SMB/SPM, CEM e Saville *et al.* apresentaram comportamento semelhante, indicando que a velocidade do vento exerce influência dominante independentemente da formulação adotada. No cenário de 120 km/h, correspondente a um aumento de 20% em relação ao cenário base, as alturas normalizadas atingiram valores entre 1,21 e 1,26, ou seja, acréscimos de aproximadamente 21% a 26%.

A influência do fetch foi menos intensa. Mesmo com a duplicação do fetch em relação ao cenário base, a altura normalizada atingiu valores entre 1,39 e 1,41, evidenciando crescimento sublinear em todas as metodologias, incluindo o método de Saville *et al*. Para um acréscimo de 20% no fetch, os aumentos na altura significativa ficaram entre 9% e 12%, valores consideravelmente inferiores aos observados para a mesma variação percentual da velocidade do vento.

Dessa forma, para variações percentuais equivalentes, a velocidade do vento apresentou influência aproximadamente 2 a 2,5 vezes superior à do fetch sobre a altura significativa de onda, em todas as quatro metodologias avaliadas. Esse resultado reforça que a definição da velocidade de vento de projeto constitui uma das etapas mais sensíveis da aplicação das metodologias empíricas avaliadas, independentemente da formulação adotada.

Cabe registrar que, na verificação do parâmetro gF/U^2 (Seção 2.3.4), apenas os cenários de vento entre 50 e 70 km/h e o de fetch duplicado (F/F0 = 2,0) permanecem dentro da faixa de calibração do método de Saville et al.; os demais pontos, incluindo o cenário base, extrapolam essa faixa. Ainda assim, o comportamento normalizado

do método acompanhou consistentemente o das demais formulações ao longo de toda a análise.

4. DIRETRIZES PARA APLICAÇÃO EM PROJETOS

Os resultados obtidos indicam que a aplicação de metodologias empíricas para estimativa de ondas em reservatórios deve considerar não apenas a equação de cálculo da altura significativa, mas também os critérios adotados para definição do fetch, da velocidade do vento e, quando aplicável, da profundidade representativa.

No estudo realizado, as quatro metodologias avaliadas produziram alturas de onda da mesma ordem de grandeza. Entretanto, as diferenças observadas foram suficientes para alterar o nível relativo de conservadorismo entre os métodos, especialmente quando se distinguem a aplicação principal, com o fetch recomendado para cada metodologia, e o cenário de controle, com fetch comum. A Tabela 3 apresenta uma síntese das diretrizes propostas para seleção e aplicação das metodologias empíricas avaliadas em projetos de engenharia de barragens.

Tabela 3 – Diretrizes práticas para aplicação das metodologias empíricas avaliadas.

Condição de Aplicação	Diretriz Recomendada	Observação
Avaliação preliminar	USBR, CEM ou Saville *et al.*	Métodos de aplicação direta (equações fechadas).
Estudos de borda livre em barragens	USBR	Possui diretrizes específicas para barragens.
Compatibilidade com procedimentos USACE	CEM	Representa a abordagem mais atualizada do USACE para previsão de ondas
Reservatórios rasos ou com limitação por profundidade	SMB/SPM	O SMB/SPM incorpora a profundidade diretamente na formulação; CEM e Saville *et al.* utilizam verificação posterior; o USBR não considera profundidade em sua equação.
Reservatórios com geometria irregular	Avaliar diferentes critérios de fetch.	O fetch altera a variável de entrada dos métodos.
Fetch muito curto associado a ventos de projeto elevados	Verificar faixa de validade do parâmetro adimensional no método de Saville *et al.*	Valores fora da faixa indicada extrapolam a formulação original, requerendo cautela adicional na interpretação dos resultados.
Ausência de dados locais de vento	Realizar análise de sensibilidade	A velocidade do vento foi a variável de maior influência nas estimativas.

A definição do fetch deve ser tratada como etapa metodológica relevante, sobretudo em reservatórios de geometria irregular. O uso de um fetch retilíneo pode ser adequado para aplicações diretas e para o procedimento do CEM, mas pode superestimar a extensão efetivamente disponível para geração de ondas quando a direção central apresenta comprimento livre elevado e as margens laterais se aproximam rapidamente.

O procedimento radial do USBR e o método de Saville incorporam, em diferentes níveis, a influência da geometria lateral do reservatório. Por isso, recomenda-se que o critério de fetch permaneça compatível com a metodologia de onda adotada. Não é indicado combinar indiscriminadamente valores de fetch obtidos por um procedimento com equações originalmente associadas a outro critério, sem análise de sensibilidade ou justificativa técnica, sendo esse justamente o propósito diagnóstico do cenário de fetch comum discutido na Seção 3.2, e não uma recomendação de combinação para fins de projeto.

A velocidade do vento merece atenção especial, pois foi a variável que apresentou maior influência relativa sobre a altura significativa de onda em todas as metodologias avaliadas. Em estudos de barragens, nem sempre há séries anemométricas locais representativas, com duração, altura de medição, exposição e direção compatíveis com o reservatório analisado.

Nesses casos, é comum a adoção de velocidades normativas ou conservadoras, o que pode ser adequado do ponto de vista de segurança. Ressalta-se, contudo, que valores padronizados devem ser compatibilizados com a condição climática regional: a NBR 6123 [16] indica que a velocidade básica do vento no Brasil varia entre 108 a 173 km/h conforme a região, de modo que um valor único adotado indiscriminadamente pode ser não conservador em áreas de maior severidade eólica, ou excessivamente conservador em regiões mais amenas.

Há ainda uma diferença conceitual entre a velocidade de rajada de 3 segundos definida pela norma e a velocidade sustentada exigida pelos métodos de previsão de onda, bem como entre a altura padrão de medição em estações meteorológicas (10 m) e a altura ou exposição sobre a lâmina d'água considerada em cada formulação, aspecto parcialmente tratado na literatura de Saville *et al.* por meio de fatores de correção entre vento sobre terra e sobre água. Essa premissa deve ser explicitada no estudo, pois afeta diretamente o dimensionamento da borda livre e das proteções marginais. Recomenda-se compatibilizar a velocidade adotada com a condição climática local, incluindo os ajustes de rajada, altura e exposição pertinentes, preferencialmente com apoio em dados anemométricos regionais, além de avaliar diferentes velocidades de vento ou realizar análise de sensibilidade sempre que possível.

A profundidade deve ser considerada conforme a natureza da metodologia utilizada. No USBR, essa variável não participa diretamente da equação de altura significativa, mas pode ser relevante como verificação de aplicabilidade em condições de profundidade limitada. No CEM e no método de Saville *et al.*, a profundidade atua como critério de limitação posterior, quando a altura calculada excede valores compatíveis com a lâmina d'água disponível ($H_{max} = 0{,}78D$, no caso do método de Saville *et al.*).

No SMB/SPM, a profundidade é incorporada diretamente na formulação, permitindo representar a restrição ao crescimento das ondas em condições de profundidade finita. Em reservatórios rasos, braços laterais ou regiões marginais com pequena lâmina d'água, esse aspecto pode ser decisivo na escolha da metodologia, pois a profundidade pode limitar a altura significativa estimada.

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se que estudos de ondas em reservatórios não sejam conduzidos apenas pela aplicação direta de uma equação empírica. A definição do ponto de análise, do critério de fetch e da velocidade de vento de projeto deve ser documentada de forma explícita, pois essas escolhas podem influenciar o resultado tanto quanto a própria metodologia selecionada.

Em aplicações práticas, o uso de mais de uma metodologia pode ser útil para avaliar a faixa provável de resultados e identificar o nível de conservadorismo adotado. Para estudos preliminares ou situações com menor disponibilidade de dados, métodos de aplicação direta, como USBR, CEM e, com atenção à faixa de validade do parâmetro de fetch, o método de Saville *et al*., podem fornecer estimativas rápidas e compatíveis com a prática de engenharia, desde que suas premissas sejam respeitadas.

Para análises em reservatórios rasos ou em locais onde a profundidade possa limitar o crescimento das ondas, o SMB/SPM apresenta vantagem por incorporar essa variável diretamente na formulação. Independentemente do método selecionado, a velocidade do vento deve ser tratada como premissa crítica de projeto, sendo recomendável avaliar sua influência por meio de cenários alternativos sempre que não houver base anemométrica local suficientemente representativa.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho comparou quatro metodologias empíricas consagradas para estimativa de ondas geradas pelo vento em reservatórios: USBR, SMB/SPM, CEM e Saville *et al.*; com foco na aplicação em projetos de barragens, borda livre e proteção do talude de montante. A análise evidenciou que os quatro métodos produziram resultados da mesma ordem de grandeza para o reservatório estudado, porém com diferenças relevantes associadas tanto às formulações de cálculo quanto aos critérios de determinação do fetch.

Na aplicação principal, as alturas significativas de onda resultaram em 0,44 m pelo USBR, 0,44 m pelo SMB/SPM, 0,53 m pelo CEM e 0,45 m pelo método de Saville *et al*., indicando que a escolha metodológica pode alterar o nível de conservadorismo adotado em projeto. A comparação com fetch comum revelou diferenças mais expressivas entre as formulações: SMB/SPM e Saville *et al.* mostraram-se cerca de 27% e 30% mais conservadores que USBR e CEM, respectivamente, evidenciando que parte da proximidade observada na aplicação principal decorre da compensação entre o fetch adotado e a formulação empírica, e não de uma equivalência real entre os métodos.

A caracterização do fetch mostrou-se uma etapa sensível da análise. Para o mesmo ponto de referência na barragem, foram obtidos valores de 1.027 m pelo fetch retilíneo direcional, 704 m pelo procedimento radial do USBR e 420 m pelo método de Saville.

Essa diferença demonstra que, em reservatórios de geometria irregular, a adoção de um único comprimento retilíneo pode não representar adequadamente a largura efetiva disponível para geração das ondas, embora a hierarquia observada entre os critérios não deva ser generalizada.

A análise de sensibilidade indicou que a velocidade do vento foi a variável de maior influência sobre a altura significativa de onda nas quatro metodologias avaliadas, com efeito do fetch consistentemente sublinear. Verificou-se, adicionalmente, que a aplicação do método de Saville *et al.* às condições de fetch curto e vento elevado do estudo de caso extrapola a faixa de validade original do parâmetro adimensional de fetch, reforçando a necessidade de verificar a aplicabilidade de cada formulação às condições específicas do reservatório analisado.

Como contribuição prática, o estudo reforça que a aplicação de métodos empíricos para estimativa de ondas em reservatórios não deve se limitar à escolha de uma equação de cálculo. É necessário compatibilizar a metodologia com o critério de fetch correspondente, verificar sua faixa de validade quando aplicável, justificar a velocidade de vento adotada, preferencialmente compatibilizada com a variabilidade climática regional indicada pela NBR 6123, e avaliar, quando aplicável, a influência da profundidade. Para estudos preliminares, USBR, CEM e Saville *et al.* apresentam maior simplicidade operacional; em reservatórios rasos, o SMB/SPM oferece vantagem por incorporar a profundidade diretamente na formulação. Em todos os casos, recomenda-se documentar as premissas adotadas e realizar análise de sensibilidade para avaliar o impacto das variáveis de entrada sobre as decisões de projeto.

6. PALAVRAS-CHAVE

Ondas em reservatórios, Borda livre, Fetch efetivo, Engenharia de barragens.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ICOLD (2011) – "Guidelines on Freeboard for Dams", ICOLD Bulletin, Paris.

[2] USACE (1984) – "Shore Protection Manual", technical manual edited by U.S. Army
Corps of Engineers, Washington, D.C.

[3] USBR (1987) – "Design of Small Dams", book edited by U.S. Bureau of Reclamation, Denver.

[4] MATTOSINHO, G.O.; et al. (2022) – "Meteorological–hydrodynamic model coupling
for safe reservoir operation", journal article published in Revista Brasileira de Recursos

Hídricos, Porto Alegre, Brazil.

[5] USACE (2011) – "Coastal Engineering Manual", technical manual edited by U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

[6] USBR (2012) – "Riprap Design Criteria, Guidelines, and Specifications", technical report edited by U.S. Bureau of Reclamation, Denver.

[7] SAVILLE, T. JR. (1954) – "The Effect of Fetch Width on Wave Generation", Technical Memorandum No. 70, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers,
Washington, D.C.

[8] SAVILLE, T. JR.; McCLENDON, E.W.; COCHRAN, A.L. (1962) – "Freeboard Allowances for Waves in Inland Reservoirs", Journal of the Waterways and Harbors Division, American Society of Civil Engineers, v. 88, n. WW2, United States.

[9] ELETROBRÁS (2003) – "Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas", manual técnico editado por Centrais Elétricas Brasileiras S.A., Rio de Janeiro.

[10] USBR (2012) – "Design Standards No. 13: Embankment Dams, Chapter 6: Freeboard", design standard edited by U.S. Bureau of Reclamation, Denver.

[11] MARQUES, M.; ANDRADE, F.O.; VITAL, E.P.A.; GUETTER, A.K. (2013) – "Método Rápido para a Determinação do Fetch Máximo", XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais..., Bento Gonçalves, Brasil.

[12] MARQUES, M.; ANDRADE, F.O. (2017) – "Automated Computation of Two-Dimensional Fetch Fields: Case Study of the Salto Caxias Reservoir in Southern Brazil", Lake and Reservoir Management, v. 33, n. 1, p. 62–73, United States.

[13] SEYMOUR, R.J. (1977) – "Estimating Wave Generation on Restricted Fetches", Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, American Society of Civil Engineers, v. 103, n. WW2, p. 251–263, United States.

[14] SMITH, J.M. (1991) – "Wind-Wave Generation on Restricted Fetches", Miscellaneous Paper, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg.

[15] BISHOP, C.T.; DONELAN, M.A.; KAHMA, K.K. (1989) – "Shore Protection Manual's Wave Prediction Reviewed", technical report published by National Water Research Institute, Burlington, Canada.

[16] ABNT NBR 6123 (2023) – "Forças devidas ao vento em edificações", norma técnica
editada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

	**Leonardo de Souza LISBOA** Engenheiro civil pela Universidade Estadual Paulista (2022) e mestre em engenharia de recursos hídricos e ambiental pela Universidade Federal do Paraná (2024). Atuou como pesquisador por 2 anos no Instituto Tecnológico de Transporte e Infraestrutura (UFPR) na área de saneamento, e atualmente exerce a função de Engenheiro de Recursos Hídricos para projetos de infraestrutura na G5 Engenharia & Gerenciamento.
	**Rodolfo Rosendo de CARVALHO** Engenheiro Civil graduado pela Universidade Federal do Paraná (2013). Trabalha há 12 anos com projetos na área de hidrologia e hidráulica para obras de infraestrutura no geral, e atualmente exerce a função de Coordenador do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente na G5 Engenharia & Gerenciamento.
	**Joaquim Monteiro Garcez DUARTE** Engenheiro Civil graduado pela Universidade Federal do Paraná (1982) com mestrado em Geotecnia pela Poli-USP (1986). Possui mais de 30 anos de experiência em trabalhos de Engenharia Geotécnica, com ênfase nas áreas de Obras Subterrâneas e Geotecnia de Obras Hidrelétricas, tendo atuado em projetos de infraestrutura no Brasil e no exterior. Exerce atualmente a função de Diretor Técnico de Engenharia Civil da G5 Engenharia & Gerenciamento.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.1
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

FREQUÊNCIA NATURAL DE BARRAGENS E PILHAS DE REJEITO: METODOLOGIA E APLICAÇÕES EM AVALIAÇÕES DINÂMICAS EM MINAS GERAIS

Felipe Vianna Amaral de Souza CRUZ
Gerente de Geotecnia - DF+ Engenharia

Débora Thais MESAVILLA
Coordenadora de Projetos - DF+ Engenharia

Marina Paula SECCO
Engenheira Geotécnica - DF+ Engenharia

Naiala Fidelis GOMES
Engenheira Geotécnica - DF+ Engenharia

Gabriel de Oliveira SANT'ANA
Coordenador de Projetos - Apoan

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo sobre a frequência natural de barragens e pilhas de rejeitos, com o objetivo de comparar os valores de frequência obtidos por diferentes metodologias, visando gerar um intervalo de frequências representativo para a região de Minas Gerais. A análise é conduzida por meio da determinação do período fundamental não línear das estruturas, transformados em frequência, a fim de fornecer frequência natural para ser incorporada na determinação de limites de vibração aplicáveis a projetos e análises sísmicas. Para tanto, são utilizados resultados teóricos das metodologias propostas por Papadimitriou et al. (2014) e Bray e Macedo (2019), considerando diversos tipos de barragens e pilhas de rejeitos, incluindo aquelas com diferentes geometrias, materiais e condições de fundação, representativas das características mais comuns no Quadrilátero Ferrífero e em outras regiões mineradoras de Minas Gerais. Os resultados indicam que as frequências naturais das barragens e pilhas de rejeitos variam consideravelmente dependendo de fatores como: (i) altura da superfície de ruptura, (ii) rigidez do maciço, (iii) tipo de material de rejeito e (iv) condições de saturação e de drenagem. Em média, as frequências naturais observadas ficaram na faixa de 3,2 a 5,0 Hz, com uma concentração mais alta em valores próximos a 5 Hz. Com base nesses dados, foi possível identificar intervalos de frequências típicas para diferentes tipologias de estruturas de rejeitos, proporcionando parâmetros de referência que podem ser utilizados para a definição de limites de vibração em estudos sísmicos. Esse intervalo é útil não apenas para garantir a segurança estrutural das barragens e pilhas de rejeitos, mas também para orientar quanto a especificação de equipamentos que podem trabalhar nas estruturas e melhorando a previsibilidade do comportamento estrutural durante sismos induzidos, como corte

a fogo ou ferrovias que passem próximos. Os resultados fornecem um conjunto de ferramentas para a avaliação dinâmica de estruturas de rejeitos, com base em frequências naturais específicas, que podem ser aplicadas em análises de segurança e dimensionamento de projetos de engenharia de barragens e pilhas de rejeitos em Minas Gerais.

ABSTRACT

This paper presents a study on the natural frequency of tailings dams and tailings piles, with the objective of comparing frequency values obtained through different methodologies in order to generate a representative frequency range for the state of Minas Gerais. The analysis is carried out by determining the nonlinear fundamental period of the structures, converted into frequency, so as to provide natural frequency values to be incorporated into the determination of vibration limits applicable to seismic design and analysis projects. To this end, theoretical results from the methodologies proposed by Papadimitriou et al. (2014) and Bray and Macedo (2019) are employed, considering a variety of tailings dams and tailings piles, including those with different geometries, materials, and foundation conditions representative of the most common characteristics found in the Quadrilátero Ferrífero and other mining regions of Minas Gerais. The results indicate that the natural frequencies of tailings dams and tailings piles vary considerably depending on factors such as: (i) failure surface height, (ii) mass stiffness, (iii) tailings material type, and (iv) saturation and drainage conditions. On average, the observed natural frequencies ranged from 3.2 to 5.0 Hz, with a higher concentration of values near 5 Hz. Based on these data, it was possible to identify typical frequency ranges for different typologies of tailings structures, providing reference parameters that can be used to define vibration limits in seismic studies. This range is useful not only for ensuring the structural safety of tailings dams and tailings piles, but also for guiding the specification of equipment that may operate on these structures, improving the predictability of structural behavior during induced seismic events such as blasting or railway traffic in the vicinity. In conclusion, the results provide a set of tools for the dynamic assessment of tailings structures based on site-specific natural frequencies, which can be applied in safety evaluations and design of tailings dam and tailings pile engineering projects in Minas Gerais.

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens e pilhas de rejeitos é uma das maiores preocupações da engenharia geotécnica no contexto da mineração brasileira. O cenário regulatório vem passando por profundas transformações desde a promulgação da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB. 2010), revisões das normas, publicação do Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM, 2020) e das resoluções da Agência Nacional de Mineração (ANM), que estabeleceram requisitos mais rigorosos para a gestão de riscos dessas estruturas.

Nesse contexto, a avaliação do desempenho dinâmico de barragens e pilhas de rejeitos tornou-se cada vez mais relevante, seja para a definição das análises de comportamento sísmico, avaliando quanto a sismos naturais, seja para avaliação de limites de vibração para sismos induzidos. A frequência natural de uma estrutura geotécnica é um parâmetro fundamental nessas avaliações, pois determina a faixa de excitações às quais a estrutura é mais sensível e informa critérios de projeto voltados à prevenção de fenômenos de ressonância.

Apesar de sua relevância, a frequência natural de barragens e pilhas de rejeitos raramente é determinada de forma sistemática em estudos brasileiros. As metodologias disponíveis na literatura internacional variam desde soluções analíticas clássicas do tipo *shear beam*, propostas por Gazetas (1982, 1987) e Oner (1984), que modelam a estrutura como uma coluna de cisalhamento com distribuição de rigidez variável ao longo da altura, até formulações calibradas numericamente por Papadimitriou et al. (2014) e Bray e Macedo (2019, 2023, 2024), que incorporam a não linearidade do comportamento tensão-deformação e distintas condições de fundação. Métodos baseados em registros sísmicos instrumentados em campo, como os utilizados por Park & Kishida (2019), permitem a identificação das frequências modais a partir da resposta dinâmica real das estruturas durante eventos sísmicos, oferecendo aderência direta às condições in situ, embora ainda sejam pouco empregados no Brasil. Mais recentemente, técnicas de medição de ruído ambiental têm se consolidado como alternativa não invasiva e de baixo custo para a caracterização dinâmica de estruturas geotécnicas. Entre essas, destaca-se o método HVSR (*Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*), baseado na razão espectral entre as componentes horizontal e vertical do ruído sísmico ambiente, que permite identificar picos de amplificação associados à frequência fundamental da estrutura sem a necessidade de fonte de excitação controlada (Nakamura, 1989). Pastén et al. (2023) aplicaram essa abordagem em estruturas de rejeitos, demonstrando sua viabilidade para a estimativa de frequências naturais em campo. Complementarmente, ensaios de vibração forçada e técnicas de análise modal operacional (OMA - Operational Modal Analysis) têm sido empregados para a identificação das propriedades dinâmicas de barragens de terra e enrocamento (Foti et al., 2014), embora sua aplicação em estruturas de rejeitos permaneça limitada. A diversidade dessas abordagens reflete tanto a complexidade do comportamento dinâmico dessas estruturas quanto a ausência de um protocolo padronizado para a determinação da frequência natural no âmbito dos projetos de engenharia de barragens no Brasil.

O presente artigo tem como objetivo comparar os valores de frequência natural obtidos por duas metodologias distintas: o período predominante não linear proposto por Papadimitriou et al. (2014) e o período predominante de vibração empírico de Bray

e Macedo (2019, 2023), aplicadas a um banco de dados de 46 seções de análise de barragens e pilhas de rejeitos representativas das condições geotécnicas de Minas Gerais. A comparação visa demonstrar a equivalência entre as duas abordagens e, a partir dos resultados consolidados, definir intervalos de frequência natural de referência para aplicação em projetos e análises sísmicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Período Fundamental Não Linear de Estruturas de Terra

O período fundamental de vibração T de uma estrutura de aterro ou rejeito pode ser estimado a partir de formulações que incorporam os efeitos não lineares do comportamento dinâmico do solo. Diferentemente de estruturas de concreto, nas quais as propriedades elásticas dominam o comportamento dinâmico, as estruturas geotécnicas apresentam comportamento fortemente dependente do nível de deformação imposto pelo evento sísmico, o que resulta em degradação da rigidez e no consequente aumento do período de vibração em relação ao valor elástico (Gazetas, 1987; Ghaemi & Konrad, 2022).

Papadimitriou et al. (2014) desenvolveram uma metodologia completa e sequencial para a obtenção do período predominante não linear de barragens de terra e aterros, fundamentada em 110 análises numéricas não lineares bidimensionais executadas no código de diferenças finitas FLAC, abrangendo seções com alturas entre 20 e 120 m, diferentes condições de fundação (Vb entre 250 e 1500 m/s) e distintos níveis de excitação sísmica (PGA entre 0,05 g e 0,50 g). O racional proposto parte da estimativa do período elástico fundamental Toe da estrutura, obtido por regressão estatística das análises paramétricas de baixa intensidade, resultando na expressão:

$$T_{oe} = 0{,}024H^{0{,}75} \qquad (1)$$

onde H é a altura da barragem em metros e T_{oe} é expresso em segundos, entende-se que H sendo a altura da estrutura é uma simplificação em busca que superfícies de falha globais, mas tendo-se a altura da superfície de ruptura crítica, pode se utilizar a mesma como H. Essa formulação incorpora indiretamente a variação das propriedades de rigidez com a profundidade, característica intrínseca das estruturas geotécnicas, e é consistente com a simplificação analítica derivada de Dakoulas e Gazetas (1985) para seções triangulares sobre rocha rígida. A partir do valor elástico T_{oe}, o período não linear T_o é obtido por uma equação de amplificação que captura os dois principais mecanismos de aumento de período: (i) a degradação do módulo de cisalhamento com o aumento do nível de deformação cíclica, governada pela intensidade do movimento sísmico, que na metodologia proposta por Papadimitriou eta al (2014) é obtido através do Pico de aceleração no Terreno, conhecido pela sigla em inglês (PGA); e (ii) a redução do amortecimento por radiação na base da estrutura, governada pela rigidez da fundação obtido através da velocidade de onda cisalhante

(V_b). Esses efeitos são quantificados pela razão T_o/T_{oe}, expressa em função de PGA, V_b e da relação entre o período elástico da barragem e o período predominante da excitação (T_{oe}/T_e), esta última incorporada para evitar superestimativa da não linearidade em excitações de alta frequência. A metodologia resulta em um período predominante não linear T_o que representa o período no qual se observa a máxima amplificação espectral entre a base e a crista da barragem, ou seja, o período associado ao pico da função de transferência da estrutura durante o evento sísmico de projeto.

A conversão entre período fundamental T, em segundos, e frequência natural f, em Hz, é dada pela relação direta:

$$f=1/\mathrm{T} \tag{2}$$

Na metodologia proposta por Bray e Macedo (2019, 2023), o período fundamental linear da estrutura de aterro é estimado pelo período de site Ts, dado pela equação (3):

$$T_S=\frac{4H'}{V_s} \tag{3}$$

onde H' é a altura corrigida em função do formato da superfície de ruptura potencial e V_s é a velocidade média de onda de cisalhamento do terreno na região de interesse, formulação derivada da teoria do *shear beam* (Gazetas, 1982), conforme ilustrado na Figura 1.

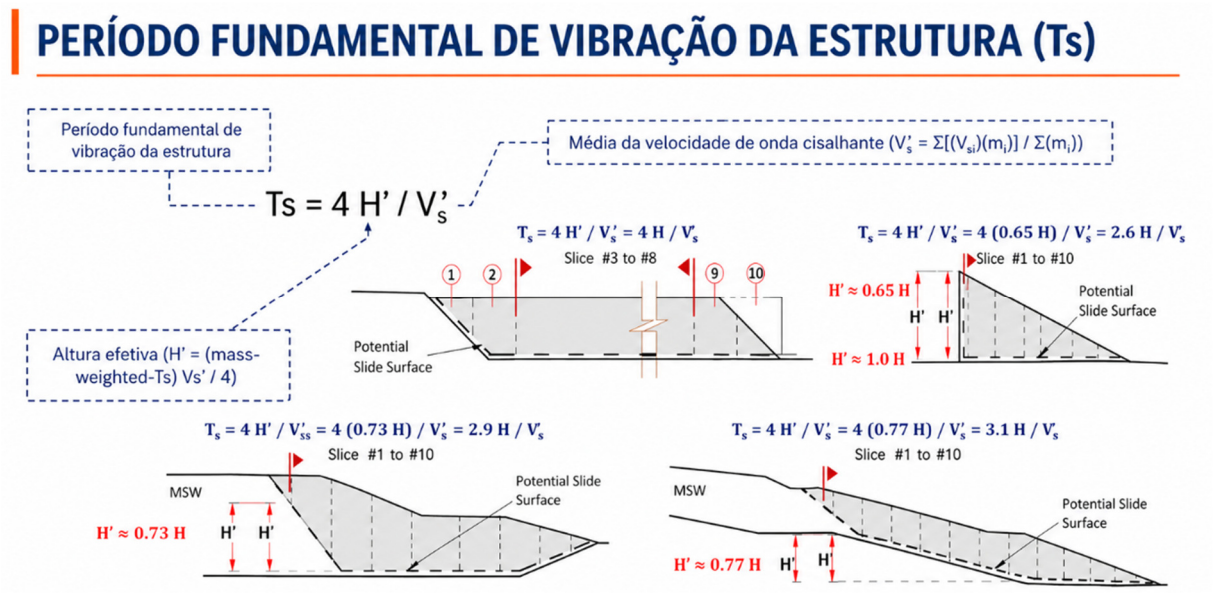


Figura 1 – Determinação de H' pelo tipo de superfície de ruptura (Bray e Macedo, 2023)

Diferentemente de Papadimitriou et al. (2014), a metodologia de Bray e Macedo (2019, 2023) não adota um racional teórico explícito para a obtenção de um período fundamental não linear da estrutura. Em substituição, os autores calibraram a

metodologia com um extenso banco de dados de medições de campo e análises numéricas, identificando empiricamente que a aceleração espectral avaliada no período 1,3Ts - correspondente a um alongamento de 30% em relação ao período linear, buscando representar a demanda sísmica que melhor correlaciona as previsões do método com os deslocamentos permanentes observados. Esse fator de 1,3 captura, de forma implícita e calibrada, os efeitos combinados da não linearidade do solo e do comportamento dinâmico acoplado da massa deslizante, sem exigir a estimativa explícita do período não linear T_o como etapa intermediária do cálculo. A aceleração espectral Sa(1,3Ts), extraída do espectro de resposta do movimento sísmico de projeto com 5% de amortecimento, constitui assim o parâmetro de intensidade central da metodologia, concentrando em uma única grandeza a influência das características dinâmicas da estrutura e da excitação sísmica.

3. BANCO DE DADOS E PARÂMETROS

3.1 Banco de Dados

O banco de dados utilizado neste estudo compreende 46 seções de análise de barragens e pilhas de rejeitos localizadas em Minas Gerais. As análises foram realizadas no âmbito de estudos de segurança e projetos de engenharia conduzidos para clientes do setor de mineração.

Do total de 46 seções analisadas, 38 correspondem a barragens de rejeitos e 08 correspondem a pilhas de rejeitos (estruturas de deposição a seco ou por empilhamento). As estruturas apresentam ampla variação de características geométricas e geotécnicas, assumindo como F_0 – Papadimitriou as frequências advindas do período fundamental não linear e F_0 – Bray e Macedo as frequências advindas do período fundamental da aceleração espectral, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 – Banco de dados: estruturas analisadas, características principais e frequências naturais obtidas pelas duas metodologias. H = altura da superfície de ruptura; Vs = velocidade de onda de cisalhamento representativa; F_0 = frequência baseada em Papadimitriou et al. (2014); Fts = frequência baseada em Bray & Macedo (2019).

ID	Tipo	H (m)	Vs (m/s)	F_o - Papadimitriou (Hz)	F_o - Bray & Macedo (Hz)	Fonte
c		16,3	280	5,68	4,79	
b-2		11,8	250	8,37	9,33	
b-1		12,1	250	5,57	5,83	
d-1		14,5	300	5,81	6,27	Cruz *et al.* (2024)

ID	Tipo	H (m)	Vs (m/s)	F_o - Papadimitriou (Hz)	F_o - Bray & Macedo (Hz)	Fonte
d-2	Barragem	14,5	300	7,02	8,86	Cruz *et al.* (2024)
j-1		14,7	300	5,41	5,39	
a-2		15,2	400	3,72	4,73	
a-1		16	350	11,1	17,09	
j-4		20	300	5,52	5,94	
j-2		20,9	300	5,55	5,91	
e		25,8	180	8,46	5,17	
j-3		21,8	200	5,54	3,95	
i		31,8	300	3,35	2,57	
h-1		74	373	2,62	2,12	
h-2		78	373	2,78	2,23	
g		97	400	1,79	1,22	
f		104	450	1,81	1,33	
V-2	Barragem	117,8	298	3,98	3,09	Dados Projeto (2024 e 2025)
V-1		118,8	298	2,6	1,57	
M-1		46,8	300	8,59	8,78	
M-5		68	300	2,34	1,31	
V-3		40	560	2,83	3,63	
DE		18,6	247	14,68	13,62	
FV		97	300	4,51	4,2	
AJ-1		13,6	250	5,02	4,64	
BB-AI		16	260	5,96	5,13	
MB-5		68	300	2,35	1,31	
BB-2		21	260	6,27	5,42	
BB-3		24,9	220	6,13	5,2	

ID	Tipo	H (m)	Vs (m/s)	F_o - Papadimitriou (Hz)	F_o - Bray & Macedo (Hz)	Fonte
JP-1	Barragem	21,2	350	5,88	5,91	
DP-1		15	280	5,4	4,88	
FQV		99	300	5,17	5,27	
BB-0		25,3	260	4,88	4,51	
BB-1		32,4	180	3,28	1,41	
MR-1		15,5	300	5,31	5,11	
MR-2		16,9	350	4,71	5,47	
AJ-2		13,6	250	4,56	3,68	
JP-2		21,2	500	3,85	4,69	
PD-2	Pilha	70	370	3,35	3,17	
FS-1		90,8	300	4,79	4,03	
CD-1		125	300	6,04	5,99	
EX-1		96	351	2,59	2,15	
MZ-1		88	280	3,16	1,93	
SD-1		46,5	222	3,33	1,72	
BT-1		126,9	200	6,35	4,16	
PS-1		105,8	300	5,28	4,88	

3.2 Parâmetros de Entrada

Para cada seção de análise, os seguintes parâmetros foram determinados a partir de investigações geotécnicas, ensaios de campo e laboratório e/ou estimativas correlacionadas com dados bibliográficos:

(i) Altura da superfície de ruptura (H'), determinada a partir da geometria da seção transversal crítica e da superfície de ruptura crítica identificada em análises de estabilidade;

(ii) Velocidade média de onda de cisalhamento (Vs) do maciço, estimada a partir de ensaios sísmicos disponíveis;

(iii) As medidas das superfícies de ruptura foram obtidas através da obtenção do Ky – coeficiente de escoamento sísmico.

O período fundamental não linear T_0 foi calculado conforme Papadimitriou et al. (2014), e o período fundamental da aceleração espectral foi ontido através do acréscimo de 30% no período linear T_s conforme Bray e Macedo (2019), com ambos convertidos para frequência (Hz) para efeito de comparação e interpretação dos resultados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Correlação entre as Metodologias

A Figura 2 apresenta a correlação entre as frequências obtidas pelas duas metodologias para todas as 46 seções analisadas. A boa aderência entre os resultados é evidenciada pelo coeficiente de determinação $R^2 = 0,945$ e pela equação da regressão linear $y = 0,979x$, indicando que o período fundamental da aceleração espectral da metodologia de Bray e Macedo (2019, 2023) fornece, em média, frequências muito próximas às obtidas pelo período predominante não línear proposto por Papadimitriou et al. (2014).

A consistência entre as duas metodologias valida sua utilização de forma complementar. A abordagem de Papadimitriou et al. (2014) apresenta fundamentação teórica mais robusta, baseada em análises numéricas não lineares bidimensionais com definição explícita da superfície de ruptura, incorporação dos efeitos de rigidez da fundação e estimativa sequencial do período não linear T_o a partir de parâmetros físicos mensuráveis. A formulação de Bray e Macedo (2019, 2023), por sua vez, adota uma abordagem empírica calibrada em extenso banco de dados de medições de campo, atingindo resultados equivalentes por meio de um procedimento mais direto, centrado no parâmetro $Sa(1,3T_s)$ como medida de intensidade sísmica efetiva. A equivalência dos resultados obtidos pelas duas abordagens, demonstrada ao longo deste trabalho, sugere que o período $1,3T_s$ de Bray e Macedo (2019, 2023) e o período não linear T_o de Papadimitriou et al. (2014) convergem para uma mesma grandeza física - o período predominante de vibração da estrutura sob condições sísmicas de projeto, ainda que obtidos por caminhos metodológicos distintos.

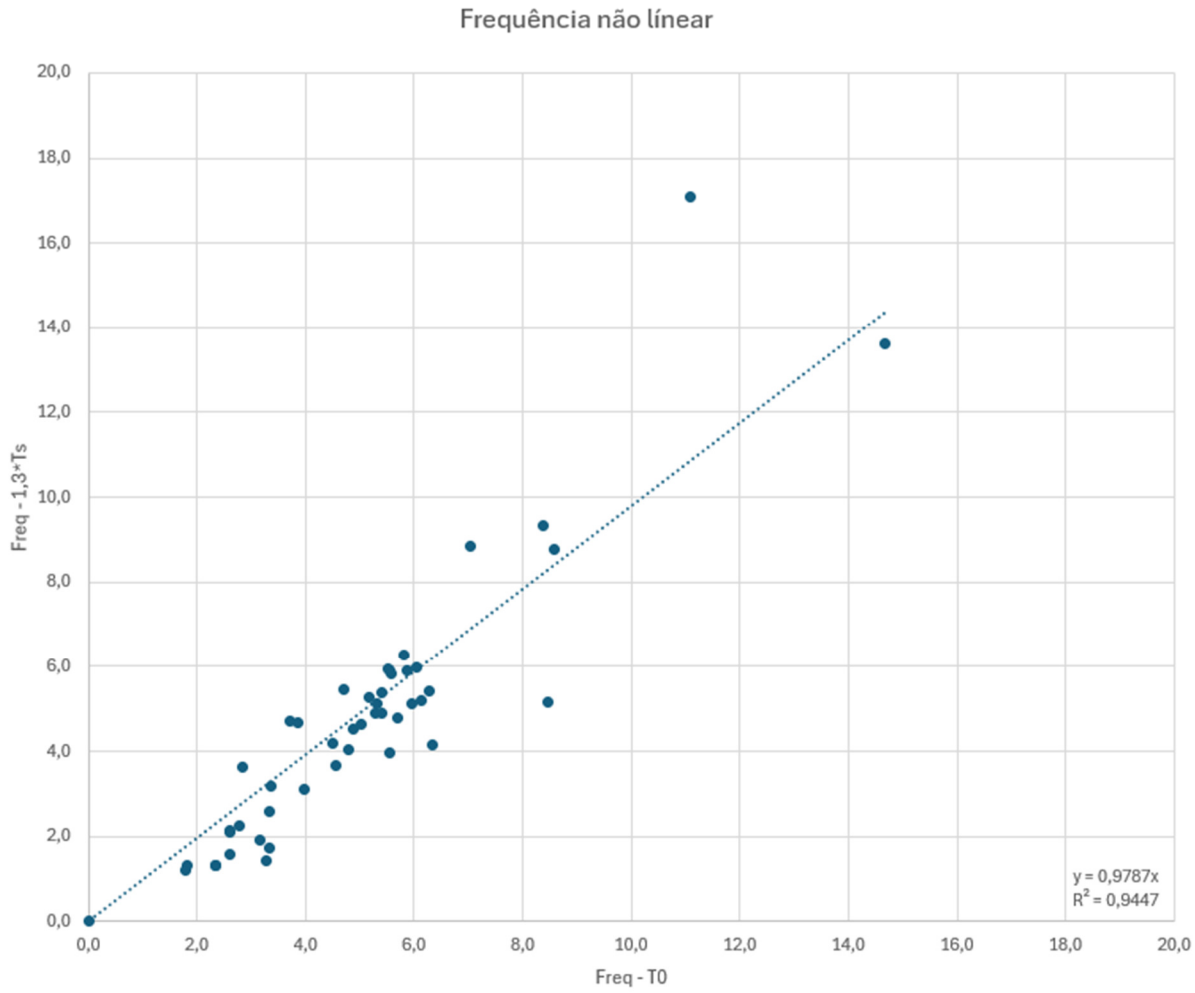


Figura 1 – Correlação entre a frequência não linear de Papadimitriou et al. (2014) versus a frequência da aceleração espectral conforme proposta de Bray e Macedo (2019, 2023)

4.2 Distribuição das Frequências Não Lineares

A distribuição das frequências naturais obtidas para o conjunto de todas as estruturas analisadas evidencia uma concentração significativa de casos na faixa de 4,5 a 6,5 Hz, correspondente a estruturas de porte médio (h' entre 15 e 30 m) com rigidez moderada (Vs entre 200 e 350 m/s). Esta é a faixa mais representativa das barragens e pilhas existentes no Quadrilátero Ferrífero.

As estruturas com maiores alturas de superfície de ruptura (H' > 60 m) apresentam as menores frequências naturais, geralmente inferiores a 3,5 Hz. Por outro lado, estruturas de menor porte com material mais rígido (Vs > 350 m/s) concentram-se na faixa entre 5 e 9 Hz, com casos extremos atingindo valores próximos a 14–17 Hz para estruturas muito rasas e rígidas.

A Tabela 2 resume as estatísticas descritivas das frequências naturais obtidas para as diferentes categorias de estruturas analisadas.

Tabela 2 – Análise estatística das frequências não lineares avaliadas.

Categoria	Média F_o T_0 (Hz)	Média F_o T_s (Hz)	Mín. F_o T_0 (Hz)	Mín. F_o T_s (Hz)	Máx. F_o T0 (Hz)	Máx. F_o T_s (Hz)
Todas as estruturas (n=46)	5,07	4,77	1,79	1,22	14,68	17,09
Barragens (n=38)	5,40	5,11	1,79	1,22	14,68	17,09
Pilhas de rejeitos (n=8)	3,98	3,93	3,28	1,41	6,35	5,47

As barragens de rejeitos apresentam frequências não lineares médias superiores às das pilhas de rejeitos - 5,40 Hz *versus* 3,98 Hz, respectivamente. Essa diferença pode ser parcialmente explicada pela tendência das pilhas de rejeitos do banco de dados a apresentarem alturas de superfície de ruptura maiores (H' médio de aproximadamente 40 m), o que, pela relação inversa entre altura e período, resulta em períodos mais longos e, consequentemente, frequências naturais mais baixas. De forma geral, cerca de 60% dos resultados do banco de dados analisado concentram-se na faixa de 3 a 7 Hz, independentemente do tipo de estrutura.

Esses intervalos de frequência natural têm aplicação direta em diferentes contextos de engenharia de barragens e mineração: (a) definição de limites de vibração para detonações a céu aberto em minas que operam nas proximidades de estruturas de disposição de rejeitos; (b) especificação de critérios de operação para equipamentos que atuam diretamente sobre barragens de rejeitos; (c) avaliação da influência de linhas ferroviárias que passam em adjacência a essas estruturas, para as quais as vibrações transmitidas ao maciço podem excitar modos predominantes de vibração; e (d) avaliação do risco de ressonância com fontes de vibração industrial de caráter periódico, como corte a fogo e operação de equipamentos rotativos de grande porte.

5. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um estudo sistemático sobre a frequência não linear de 46 seções de barragens e pilhas de rejeitos localizadas em Minas Gerais, com base nas metodologias de Papadimitriou et al. (2014) e Bray e Macedo (2019, 2023). As principais conclusões são:

(1) As duas metodologias apresentam correlação muito boa entre si (R^2 = 0,945), com desvio médio inferior a 2%, o que valida sua utilização de forma complementar em projetos e análises sísmicas de estruturas geotécnicas de disposição de rejeitos;

(2) As frequências não lineares das estruturas analisadas variam de 1,8 a 14,7 Hz, com medianas de 5,1 Hz para o conjunto geral, 5,4 Hz para barragens de rejeitos e 4,0 Hz para pilhas de rejeitos - diferença explicada, em parte, pelas maiores alturas de superfície de ruptura típicas das pilhas do banco de dados;

(3) A altura da superfície de ruptura (H') é o parâmetro de maior influência sobre a frequência natural das estruturas, seguida pela rigidez do maciço expressa pela velocidade de onda de cisalhamento (Vs);

(4) Aproximadamente 60% dos resultados avaliados apresentam frequências não lineares na faixa de 3 a 7 Hz.

Recomenda-se que estudos futuros incorporem medições de ruído ambiental pelo método HVSR em campo, com o objetivo de calibrar e validar diretamente as frequências naturais estimadas pelas metodologias empíricas aqui aplicadas. A expansão do banco de dados para incluir estruturas de outras regiões mineradoras do Brasil, como o Pará e Goiás, permitindo avaliar a representatividade regional dos intervalos de frequência obtidos e contribuiria para o desenvolvimento de critérios nacionais de vibração aplicáveis a barragens e pilhas de rejeitos.

6. PALAVRAS-CHAVE

Frequência Não Linear, Barragem de Rejeitos, Período Predominante Não Linear.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GAZETAS, G. (1982) - "Shear vibration of vertically inhomogeneous earth dams", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, v. 6, n. 2, p. 219-241.

[2] GAZETAS, G. (1987) - "Seismic response of earth dams: some recent developments", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 6, n. 1, p. 2-47.

[3] ONER, M. (1984) - "Estimation of the fundamental period of large earthfill and rockfill dams", Soils and Foundations, v. 24, p. 1-10.

[4] PAPADIMITRIOU, A. G.; BOUCKOVALAS, G. D.; ANDRIANOPOULOS, K. I. (2014) - "Methodology for estimating seismic coefficients for performance-based design of earthdams and tall embankments", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 56, p. 57-73.

[5] BRAY, J. D.; MACEDO, J. (2019) - "Procedure for Estimating Shear-Induced Seismic Slope Displacement for Shallow Crustal Earthquakes", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v. 145, n. 12.

[6] PARK, D. S.; KISHIDA, T. (2019) - "Seismic Response of Embankment Dams Based on Recorded Strong-Motion Data in Japan", Earthquake Spectra, v. 35, n. 2, p. 955-976.

[7] NAKAMURA, Y. (1989) - "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, v. 30, n. 1, p. 25-33.

[8] PASTÉN, C.; PENA, G.; COMTE, D.; DIAZ, L.; BURGOS, J.; RIETBROCK, A. (2023) - "On the use of the H/V Spectral Ratio Method to estimate the fundamental frequency of tailings dams", Journal of Earthquake Engineering, v. 27, n. 6, p. 1649-1664.

[9] GHAEMI, A.; KONRAD, J.-M. (2022) - "Empirical approaches to estimate the nonlinear dynamic responses of earth-core rockfill dams subjected to earthquake ground motions", Soils and Foundations, v. 62, n. 2, p. 101106.

[10] DAKOULAS, P.; GAZETAS, G. (1985) - "A class of inhomogeneous shear models for seismic response of dams and embankments", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 4, n. 4, p. 166-182.

[11] CRUZ, F. V. A. S.; SANT'ANA, G. O.; SECCO, M. P.; QUEIROGA, V. R. F. (2024) - "About Seismic Acceleration Coefficient for Pseudo-Static Analyses", 10th International Conference on Tailings Management - Tailings 2024, Chile.

[12] BRAY, J. D.; MACEDO, J. (2023) - "Performance-based seismic assessment of slope systems", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 168, 107835.

[13] BRAY, J.; MACEDO, J. (2024) - "Selection of the seismic coefficient in pseudostatic slope stability analyses of tailings dams", Tailings and Mine Waste 2024 (TMW), Colorado, EUA.

[14] GLOBAL TAILINGS REVIEW (2020) - "Global Industry Standard on Tailings Management" (GISTM), ICMM, UNEP, PRI.

[15] BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 - Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), Diário Oficial da União, Brasília.

[16] FOTI, S.; LAI, C. G.; RIX, G. J.; STROBBIA, C. (2014) - "Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization", CRC Press, Taylor & Francis Group, 487 p.

[12] BRAY, J. D.; MACEDO, J. (2023) - "Performance-based seismic assessment of slope systems", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 168, 107835.

[13] BRAY, J.; MACEDO, J. (2024) - "Selection of the seismic coefficient in pseudostatic slope stability analyses of tailings dams", Tailings and Mine Waste 2024 (TMW), Colorado, EUA.

[14] GLOBAL TAILINGS REVIEW (2020) - "Global Industry Standard on Tailings Management" (GISTM), ICMM, UNEP, PRI.

[15] BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 - Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), Diário Oficial da União, Brasília.

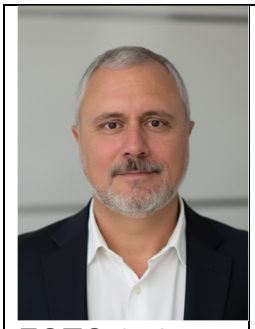
 FOTO 3x4	**Felipe CRUZ** (*CURRÍCULO - máx. 400 caracteres sem espaços)* Engenheiro civil com mais de 24 anos de experiência em Geotecnia, atualmente Doutorando em Geotecnia pela UERJ, com foco em rejeitos. Possui Mestrado em Geotecnia pela COPPE/UFRJ (2019) com ênfase em fundações, formação em Engenharia Sísmica pela Universidade da Califórnia, Berkeley (2024), e Especialização em Geotecnia pela PUC-Rio (2008), com foco em solos moles. Especialista em Geotecnia voltada para a indústria de mineração pela ABMS (2022), atua em projetos geotécnicos, offshore, fundações, análise sísmica e mineração. Atualmente está como Gerente de Geotecnia na DF+ Engenharia



FOTO 3x4

Débora MESAVILLA

Experiência em projetos de mineração e geotecnia envolvendo barragens, obras de terra, disposição/empilhamento de rejeitos e fechamento de estruturas. Experiência em Engenharia de Registros (EoR), inspeções técnicas, consolidação e interpretação de dados de campo e laboratório, e elaboração de relatórios de performance e de inspeção. Atuação como Coordenadora de Projetos, apoiando o planejamento, a gestão da equipe e a condução integrada de entregas, com interface direta com clientes e times multidisciplinares. Durante o mestrado, trabalhou no desenvolvimento e realização de ensaios de laboratório e campo, especialmente Ensaios Triaxiais e Ensaios de Placa, avaliando o comportamento e desenvolvimento de novos materiais geotécnicos. A nível de doutorado deu ênfase a trabalhos que envolvem o comportamento de rejeitos de minério de ferro levemente cimentados sob carregamento multiaxial através de ensaios em True Triaxial.



FOTO 3x4

Marina Secco

Mestre em Geotecnia pela Universidade Federal do Rios Grande do Sul (UFRGS) e Engenheira Civil pela IMED. Atualmente é doutoranda em Geotecnia pela UFRGS, com período sanduíche na Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, Engenheira Geotécnica na DF+ e docente da pós graduação da PUC-Minas. Possui experiência principalmente na execução e interpretação de ensaios avançados de laboratório para o estudo do comportamento geomecânico de rejeitos de mineração. Além de atuar em projetos de barragens, pilhas de rejeitos, descomissionamento de barragens, fechamentos de pilhas e análises sísmicas.

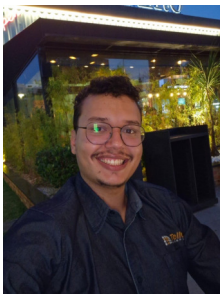


FOTO 3x4

Naiala Gomes

Mestre em Geotecnia pela COPPE e Engenheira Civil formada pela UFRJ, com graduação sanduíche na Universidade do Minho – Portugal. Possui mais de 8 anos de experiência no setor de geotecnia, sendo mais de 4 anos dedicados a projetos voltados para a geotecnia de mineração. Atuou como pesquisadora visitante no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), onde

	conduziu ensaios laboratoriais para investigação das propriedades dinâmicas dos solos, como Bender Elements e Coluna Ressonante. Atualmente, é Engenheira Geotécnica na DF+, com atuação em estudos geotécnicos, instrumentação de barragens, análise de ensaios de campo e laboratório, além de modelagem numérica aplicada à estabilidade, percolação e comportamento tensão-deformação, com uso de modelos constitutivos avançados (e.g., CASM para avaliação de rupturas por liquefação). Além de atuar em projetos de barragens, pilhas de rejeitos e descomissionamento.

	**Gabriel Sant'ana** Engenheiro Civil formado pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde também concluiu o Mestrado em Geotecnia. Atua como Coordenador de Projetos na Apoan, com foco em barragens e pilhas de rejeitos, avaliações de estabilidade e análises sísmicas para a indústria de mineração. Possui experiência na condução de estudos geotécnicos e no acompanhamento técnico de projetos de disposição de rejeitos, atuando na interface entre engenharia de projeto e gestão de segurança de barragens.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.1 DESAFIOS TÉCNICOS NO PROJETO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

Influência da intercalação de camadas delgadas na interpretação de ensaios CPTu aplicados a barragens de rejeitos de minério de ferro

Julia TEIXEIRA PASSOS FERRAREZ
Engenheira Geotécnica – Universidade Federal de Minas Gerais

Vinícius de CASTRO BOTELHO LANZA
Engenheiro Geotécnico – Pimenta de Ávila Consultoria

Ian TORRAS PAES
Engenheiro Geotécnico – Pimenta de Ávila Consultoria

Lúcio FLÁVIO VILLAR
Professor Associado – Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

A interpretação de ensaios de campo em barragens de rejeitos é condicionada pela elevada variabilidade estratigráfica e pela presença de camadas finas, características típicas desses depósitos. Essas condições impõem desafios relevantes à interpretação de ensaios de piezocone (CPTu) e à estimativa de parâmetros geotécnicos, com impactos diretos nas análises de estabilidade. Este trabalho investiga a influência das camadas finas na estimativa da resistência não drenada de rejeitos finos a partir de dados de CPTu. A análise foi desenvolvida com apoio do *software* CPET-IT, empregando os procedimentos de interpretação e as correções propostas por Boulanger e DeJong (2018), amplamente utilizados para a avaliação dos efeitos da heterogeneidade estratigráfica. Foram analisados perfis representativos de rejeitos com diferentes graus de heterogeneidade, avaliando-se a resposta do índice de comportamento do solo (*Ic*), bem como a variabilidade dos parâmetros estimados ao longo da profundidade. Os resultados indicam que a presença de camadas finas pode influenciar a interpretação dos ensaios CPTu, resultando em variações nos valores dos parâmetros de estado *in situ* dos materiais e, consequentemente, nas resistências não drenadas estimadas. A aplicação de metodologias de correção permite mitigar distorções associadas à variabilidade estratigráfica, favorecendo uma interpretação mais consistente do comportamento geotécnico dos rejeitos.

ABSTRACT

The interpretation of field tests in tailings dams is often conditioned by the high stratigraphic variability and the presence of thin layers, which are characteristic of these deposits. These conditions pose significant challenges to the interpretation of

piezocone (CPTu) data and the estimation of geotechnical parameters, directly impacting stability analyses. This study investigates the influence of thin layers on the estimation of undrained shear strength in fine-grained tailings using CPTu data. The analysis was conducted using the CPET-IT software, applying the interpretation and correction procedures proposed by Boulanger and DeJong (2018), which are widely recognized for assessing the effects of stratigraphic heterogeneity. Representative tailings profiles with varying levels of heterogeneity were analyzed to evaluate the response of the soil behavior type index (Ic) and the variability of parameters estimated with depth. The results indicate that thin layers significantly influence CPTu interpretation, leading to deviations in in situ state parameters and estimated undrained shear strength. The application of correction methodologies effectively mitigates distortions associated with stratigraphic variability, enabling a more consistent interpretation of the geotechnical behavior of tailings.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com [1], a mineração representa uma das principais atividades econômicas do Brasil, contribuindo com cerca de 4% do PIB nacional. Contudo, conforme [2], essa atividade gera rejeitos em grande escala, frequentemente e volumes superiores à quantidade de minério extraído, sendo usualmente armazenados em barragens que demandam rigorosas análises de estabilidade. Desastres como os rompimentos de Fundão (2015) e Córrego do Feijão (2019) evidenciam os riscos associados à essas estruturas, impulsionando o desenvolvimento de estudos sobre o comportamento geotécnico desses materiais.

Nesse contexto, os métodos de investigação in situ, como o ensaio de piezocone (CPTu), constituem uma ferramenta fundamental na caracterização da estratigrafia do reservatório, bem como para a identificação e caracterização dos rejeitos armazenados. Além disso, permitem um entendimento inicial sobre seu comportamento físico e mecânico e das estruturas de contenção associadas.

Contudo, a alta heterogeneidade dos rejeitos de minério de ferro facilita a formação de camadas finas (*thin layers*) com comportamentos geotécnicos distintos, mascarando valores críticos de resistência de ponta (q_t) e poropressão (u). Esse fenômeno compromete a estimativa da razão de resistência não drenada ($S_{u(pico)}/\sigma'_{v0}$) e da susceptibilidade à liquefação que, de acordo com [3], são parâmetros essenciais para a análise de estabilidade de estruturas de grande porte e alto risco, onde ocorrência do fenômeno de liquefação pode desencadear um processo de ruptura e causar danos de grandes proporções.

Para mitigar essas distorções, este trabalho aplica a metodologia de “filtragem inversa” proposta por [4], com o objetivo de validar sua eficácia na correção dos parâmetros geotécnicos, minimizando os efeitos das camadas finas para garantir uma interpretação mais confiável das propriedades dos rejeitos e seu comportamento. Para tanto, o estudo analisa a influência de camadas finas heterogêneas em reservatórios de rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, utilizando perfis representativos com diferentes graus de heterogeneidade. Avaliou-se alterações no índice de comportamento do solo (I_c), reinterpretação estratigráfica e impactos na razão de resistência não drenada de pico e liquefeita, por meio de análise estatística antes e após a aplicação da metodologia.

2. FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA

2.1. Princípios e Parâmetros do Ensaio CPTu

O ensaio de penetração de cone com medição de poropressão (CPTu) é um teste in situ amplamente utilizado na investigação geotécnica. O piezocone é cravado a uma velocidade constante de 20 mm/s, conforme [5], registrando em tempo real a resistência de ponta corrigida do cone (q_t), o atrito lateral (f_s) e a poropressão dinâmica (u), cujos dados são transmitidos por um cabo elétrico até a superfície e processador por meio de um software. A resistência de ponta corrigida do cone é calculada conforme:

$$q_t = q_c + u_2(1 - a_{net}) \quad (1)$$

Em que q_c é a resistência de ponta medida, u_2 é a poropressão dinâmica e a_{net} é a área líquida da ponta do cone.

A área líquida do cone pode ser determinada em laboratório [6], no entanto, segundo [7], pode ser definida como um valor entre $0{,}35 \leq a_{net} \leq 0{,}85$ de acordo com os modelos de cone disponíveis comercialmente, sendo recomendável que seja um valor maior do que 0,80 a fim de aumentar a confiabilidade dos resultados.

Além das variáveis obtidas durante a realização do ensaio, outras podem ser derivadas, como a taxa de poropressão (B_q), sugerida por [7], que fornece informações sobre o regime de drenagem durante a cravação:

$$B_q = \frac{\Delta u}{- \sigma_{v0}} \times 100\ q_t \quad (2)$$

Em que Δu é o excesso de poropressão (u-u_0), sendo u_0 a poropressão de equilíbrio in situ e σ_{v0} é tensão total in situ.

A partir de um estudo voltado a interpretação do comportamento de solos orgânicos, [8] sugere intervalos da taxa de poropressão (B_q) específicos para diferentes tipos de cravação do ensaio CPTu, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Intervalos sugeridos da taxa de poropressão (B_q) para determinação do tipo de cravação do ensaio CPTu. Adaptado de [8].

Tipo de cravação	$\boldsymbol{B_q}$
Drenada	$0 < B_q \leq 0{,}1$
Parcialmente drenada e não drenada	$B_q \approx 0{,}2$
Não drenada	$0{,}2 < B_q \leq 0{,}5$

A partir da obtenção dos parâmetros supracitados e do *software* de aquisição de dados conectado por cabo elétrico no piezocone, é possível gerar gráficos que representam a variação dessas grandezas ao longo da profundidade, como ilustrado na Figura 1. Esses gráficos possibilitam a interpretação detalhada das características do subsolo, permitindo a identificação de diferentes camadas estratigráficas, zonas com potenciais de instabilidade e condições anômalas do subsolo.

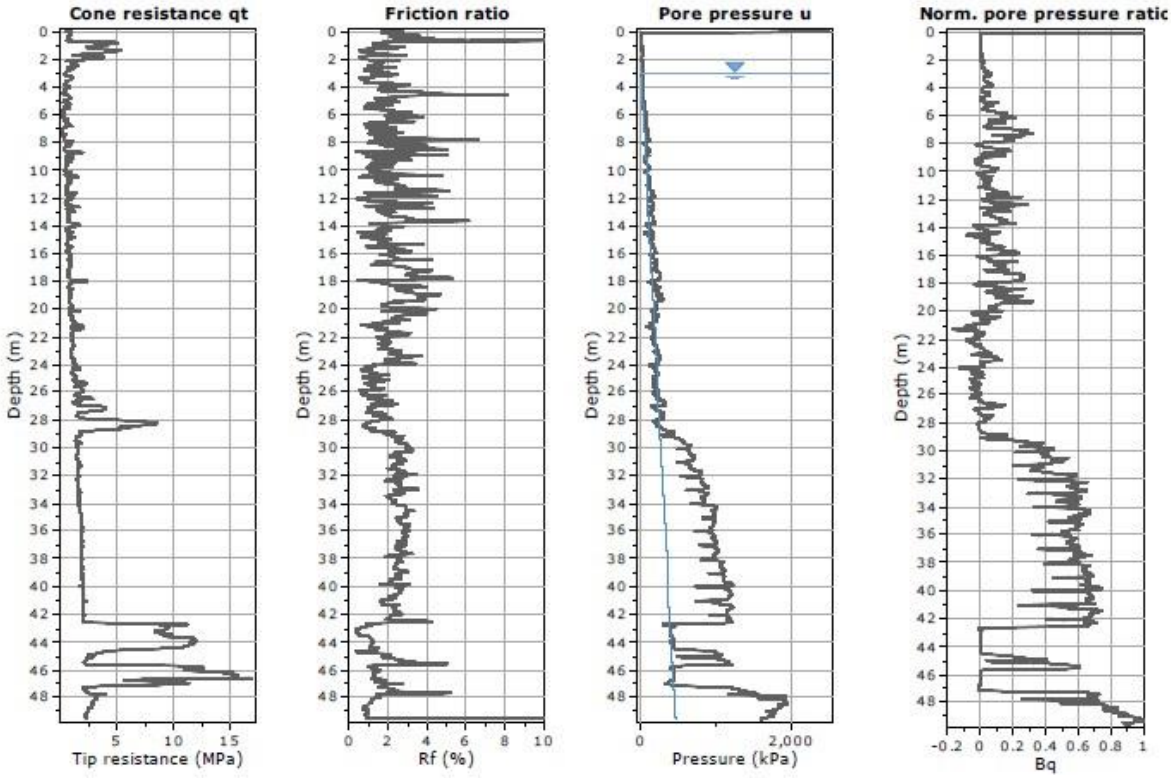


Figura 1 – Ilustração do resultado de ensaio CPTu.

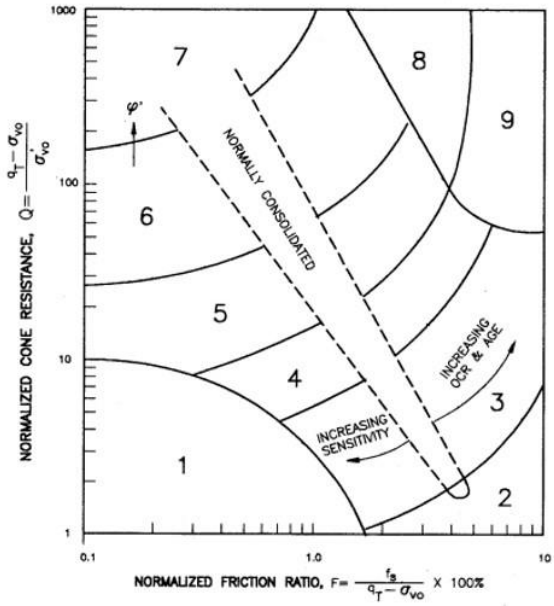
2.2. Classificação do comportamento do solo

A classificação do solo a partir do ensaio CPTu, de acordo com [9], difere da classificação a partir das características físicas do solo, proposta pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (ASTM, 2020), que se baseia na granulometria e plasticidade do material. As leituras do ensaio CPTu determinam as características mecânicas do solo, como a resistência, compressibilidade, rigidez e o comportamento do solo ou, em inglês, *Soil Behavior Type* (SBT) [10].

O ábaco SBTn, proposto por [11], que correlaciona a resistência normalizada do cone (Q_{tn}) e o atrito lateral normalizado (F_r), divide o espaço em 9 regiões associadas a diferentes comportamentos de materiais (Figura 2). Essas regiões são delimitadas pelo índice de comportamento do solo (*Ic*), o qual pode ser aproximado por raios de circunferências concêntricas, a partir da Equação (*3* proposta por [12]. A Figura 2 também apresenta os limites do índice de comportamento do solo de acordo com as zonas do ábaco e sua respectiva classificação de comportamento.

$$I_c = [(3{,}47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1{,}22)^2]^{0{,}5} \quad (3)$$

Ainda, de acordo com [13], o limite Ic = 2,60 é um limite aproximado com comportamento semelhante a areia ou semelhantes a argila.



NOTES:

Ic	ZONES	CLASSIFICATION OF SOIL BAHEAVIOR TYPES
-	1	SENSITIVE FINE GRAINED
Ic > 3,60	2	ORGANIC SOILS - PEATS
2,95 < Ic < 3,60	3	CLAYS – CLAY TO SILTY CLAY
2,60 < Ic < 2,95	4	SILT MIXTURES – CLAYEY SILT TO SILTY CLAY
2,05 < Ic < 2,60	5	SAND MIXTURES – SILTY SAND TO SANDY SILT
1,31 < Ic < 2,05	6	SANDS – CLEAN SAND TO SILTY SAND
Ic < 1,31	7	GRAVELLY SAND TO SAND
-	8	VERY STIFF SAND TO CLAYEY * SAND
-	9	VERY STIFF FINE GRAINED*

* HEAVILY OVERCONSOLIDATED OR CEMENTED

Figura 2 – CPT *soil behavior chart normalizado (SBTn)*. Adaptado de [12,13].

2.3. Correção das camadas finas pela metodologia de "Filtragem Inversa"

O ensaio CPTu, embora forneça informações confiáveis sobre a estratigrafia e as propriedades do solo, apresenta limitações na definição dos parâmetros q_t e f_s, essas leituras são influenciadas por solos em um raio de 10 a 30 diâmetros do cone — equivalente a 0,35 m a 1,30 m para cones padrão —, gerando uma zona de influência que suaviza o perfil estratigráfico [14]. Dessa forma, os valores de q_t e f_s dependem da sequência estratigráfica e das propriedades de todos os solos presentes na zona de influência, o que impacta diretamente na distribuição de resistência ao longo do perfil do solo.

A Figura 3 apresenta um solo arenoso intercalado com camadas de argila ilustrando o efeito dessas camadas na resistência durante o ensaio de penetração. De acordo com os autores [4], a resistência medida na ponta do cone (q^m) aumenta gradualmente à medida que o cone se aproxima e penetra a camada mais resistente (areia) e diminui gradualmente de forma progressiva conforme alcança e atravessa o solo subjacente menos resistente (argila). Assim, a "verdadeira" resistência de ponta do cone (q_t) corresponde ao valor que deveria ser medido no mesmo solo caso não houvesse a influência das camadas finas no perfil estratigráfico.

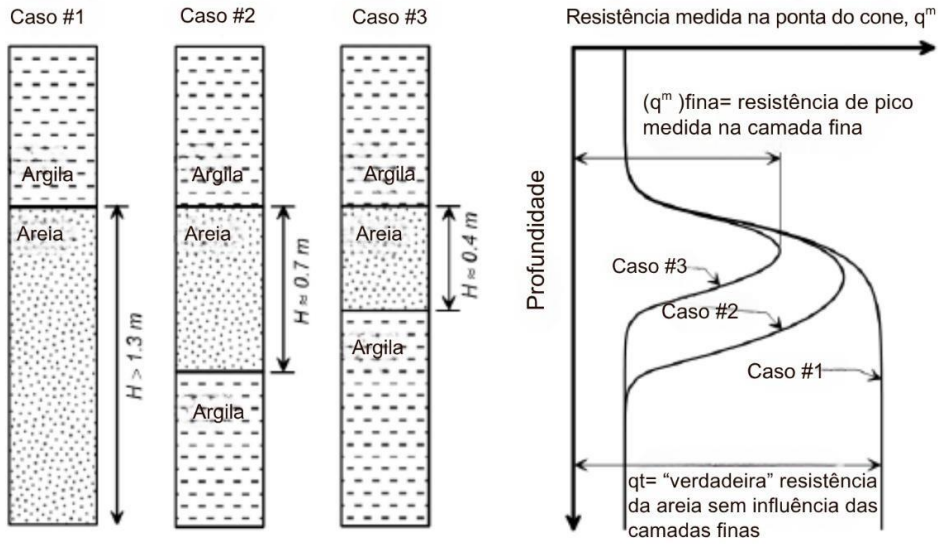


Figura 3 – Representação esquemática da influência das camadas de argila sobre a resistência de um em solo arenoso. Adaptado de [4].

Assim, a resistência medida da ponta do cone em função da profundidade ($q^m(z)$) pode ser medida conforme a Equação 4, [4].

$$q^m(z) = \int_{z_{min}}^{z_{max}} q^t(\tau) w_c(z-\tau) d\tau \quad (4)$$

Em que: $q^m(z)$ = resistência medida da ponta do cone de acordo com a profundidade; z_{max} = limite máximo da profundidade do ensaio; z_{min} = limite mínimo da profundidade do ensaio; $(z - \tau)$ = distância relativa à ponta do cone; w_c = modelo do filtro de penetração do cone.

O modelo do filtro (w_c) determina como a camada contribui para a resistência medida (q^m), sendo função de duas componentes – w_1, que controla a variação com a profundidade normalizada z', e w_2, que ajusta a influência relativa com base na diferença de resistência entre os solos adjacentes, conforme a Equação (5).

$$w_c = \frac{w_1 w_2}{\sum w_1 w_2} \quad (5)$$

Ainda, o modelo do filtro é calibrado por quatro parâmetros: $z'_{50,ref}$ (profundidade normalizada de 50% de influência de referência), m_z (ajuste da variação do filtro com a profundidade), m_{z50} (expoente de variação de z'_{50}) e m_q (expoente de variação com o contraste de resistência). Esses parâmetros possuem valores padrão adotados por [4], a saber: $z'_{50,ref}$ = 4,2, m_z = 3,0, m_{z50} = 0,5 e m_q = 2,0. Com esses parâmetros, o modelo prevê que solos até 2–3 diâmetros abaixo da ponta do cone dominam a medição quando forem consideravelmente menos resistentes do que os solos mais distantes, porém solos até 15–20 diâmetros abaixo da ponta do cone exercem influência significativa quando são menos resistentes do que os materiais mais próximos.

De acordo com o estudo [4], a inversão da resistência medida (q^m) exige um procedimento iterativo para obter uma estimativa da resistência verdadeira q_t, uma vez que o modelo do filtro depende de q_t de forma não linear. Assim, é proposto um método iterativo de substituições sucessivas da Equação (6, que converge quando o erro relativo entre as iterações consecutivas satisfaz a Equação (7).

$$q_{invn+1} = q_m + (q_{invn} - q_{invn} \times w_c) \tag{6}$$

$$\text{erro} = \frac{\sum |(q_{invn+1} - q_n^{inv})_i|}{\sum |(q_m)_i|} \leq 10^{-6} \tag{7}$$

Sendo:

$q^{inv}{}_n$ = resistência invertida do cone de penetração na enésima iteração; $q^{inv}{}_{n+1}$ = resistência invertida do cone de penetração na iteração seguinte à $q^{inv}{}_n$.

Os autores [4] apresentam, como exemplo, a aplicação do procedimento de correção por filtragem inversa em um ensaio CPT, utilizando os parâmetros de referência previamente estabelecidos. Na Figura 4, são ilustrados os perfis da resistência de ponta medida na ponta do cone (q_t) e da resistência invertida (q^{inv}) obtidas por meio do processo de filtragem inversa, evidenciando as diferenças entre os valores diretamente medidos e os ajustados segundo a metodologia proposta.

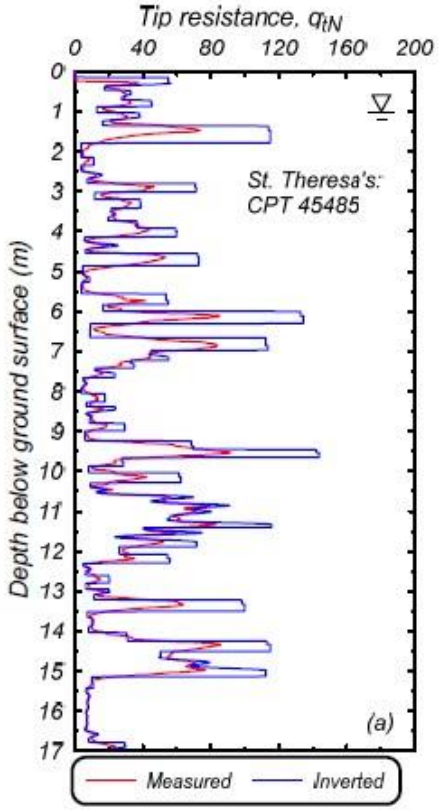


Figura 4 – Resistência medida na ponta do cone e resistência invertida do cone.
Fonte: [4].

Dessa forma, a correção de camadas finas heterogêneas por filtragem inversa aprimora estimativas de resistência de ponta (q_t) e atrito lateral (f_s) em dados CPTu. Os autores [4] destacam que o procedimento possui limitações devido à complexidade do CPTu, variabilidade geológica e fatores práticos. A aplicação de correções para camadas finas ou zonas de transição é incomum, especialmente pela subjetividade da análise em campo, que gera variações entre profissionais mesmo quando se baseiam no mesmo conjunto de dados.

2.4. Razão de resistência não drenada de pico

A razão de resistência não drenada de pico ($S_{u(pico)}/\sigma'_{v0}$) é um parâmetro crítico em projetos de estruturas de grande porte e alto risco, onde a ocorrência do fenômeno de liquefação pode desencadear um processo de ruptura e causar danos de grandes proporções [3]. Esse parâmetro pode ser obtido a partir de correlações empíricas, conforme a Equação (8, propostas por [3], com base em dados de ensaios CPTu:

$$\frac{S_{u(pico)}}{\sigma'_{v0}} = 0{,}219+0{,}008q_{c1}\pm0{,}049 \quad (8)$$

A variável q_{c1} depende da resistência de ponta à penetração do cone e da tensão efetiva no ponto, de acordo com a Equação (9.

$$q_{c1}=C_N q_c \quad (9)$$

Sendo,

$$C_N=\frac{1{,}8}{0{,}8+\frac{\sigma'_{V0}}{P_a}} \quad (10)$$

Em que:

C_N = fator de correção de tensão efetiva vertical;

Pa = pressão atmosférica (aproximadamente 101 kPa).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Área de estudo e dados utilizados

O estudo foi conduzido em duas barragens de rejeito de minério de ferro localizadas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. A análise baseou-se em 15 ensaios CPTu, numerados de CPTu-01 a CPTu-15, provenientes de investigações geotécnicas realizadas por empresas do setor. Os ensaios alcançaram profundidades entre 25,64 m e 53,84 m, com o nível d'água variando de 3,00 m a 21,00 m de profundidade, conforme mostrado na Tabela 2.

O peso específico do rejeito de minério de ferro foi definido a partir da do estudo [14], utilizando o valor médio de 21 kN/m³, obtido em amostras de rejeito fino da Barragem I do Córrego do Feijão.

Tabela 2 – Características dos ensaios CPTu analisados.

ID	Peso específico do rejeito	N.A.	Profundidade	Número de camadas estratigráficas
	(kN/m³)	(m)	(m)	
CPTu-01	21	3,00	49,56	5
CPTu-02	21	13,50	45,59	5
CPTu-03	21	10,50	49,64	6
CPTu-04	21	9,00	40,39	12
CPTu-05	21	11,50	40,51	9
CPTu-06	21	14,50	50,68	9
CPTu-07	21	15,00	52,09	9
CPTu-08	21	6,50	53,84	10
CPTu-09	21	8,50	36,26	9
CPTu-10	21	17,00	25,64	2
CPTu-11	21	12,00	29,64	10
CPTu-12	21	17,00	34,50	6
CPTu-13	21	21,00	34,38	7
CPTu-14	21	17,00	29,11	5
CPTu-15	21	13,00	29,36	8

3.2. Processamento e definição estratigráfica

Os dados dos 15 ensaios CPTu (q_t, f_s e u_2), em conjunto com o peso específico e o nível de água, foram processados no *software* CPeT-IT v3.0. A estratigrafia foi definida com base na interpretação integrada dos gráficos de q_t, B_q e I_c, utilizando como critérios principais: (i) $q_t > 5$ MPa, $0 \leq B_q \leq 0,1$ e $I_c < 2,95$ para comportamento granular; (ii) $q_t < 5$ MPa, $0,2 \leq B_q \leq 0,5$ e $I_c \geq 2,95$ para comportamento fino; e (iii) valores intermediários para camadas de transição. O limite $I_c = 2,60$ [13] foi adotado como fronteira aproximada entre areias e argilas.

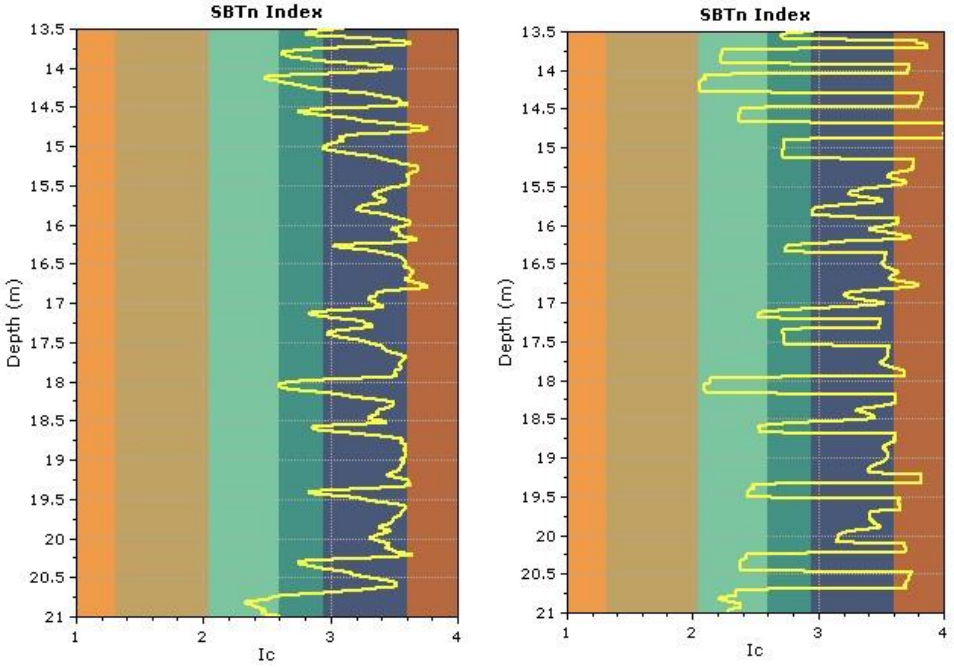
Foram identificadas seis categorias de camadas: (1) Rejeito não saturado — acima do nível de água; (2) Rejeito saturado, sendo (2.1) Rejeito com comportamento fino; (2.2) Rejeito com comportamento intermediário; (2.3) Rejeito com comportamento granular; (3) Fundação — abaixo de ~29 m de profundidade; e (4) Material possivelmente contaminante — camadas superficiais atípicas, possivelmente antigas plataformas de construção.

3.3. Aplicação da metodologia de “Filtragem Inversa”

A correção por filtragem inversa foi aplicada às camadas de rejeito saturado utilizando os parâmetros padrão do modelo de filtro sugeridos por [4]: $z'_{50,ref} = 4,2$; $m_z = 3,0$; $m_{z50} = 0,5$; $m_q = 2,0$. A análise foi conduzida comparando os parâmetros corrigidos e não corrigidos para os três ensaios selecionados como representativos de cada camada de rejeito: CPTu-02 (rejeito com comportamento fino), CPTu-03 (rejeito com comportamento intermediário) e CPTu-06 (rejeito com comportamento granular).

3.3.1 Resultados CPTu-02 – Camada de rejeito com comportamento fino

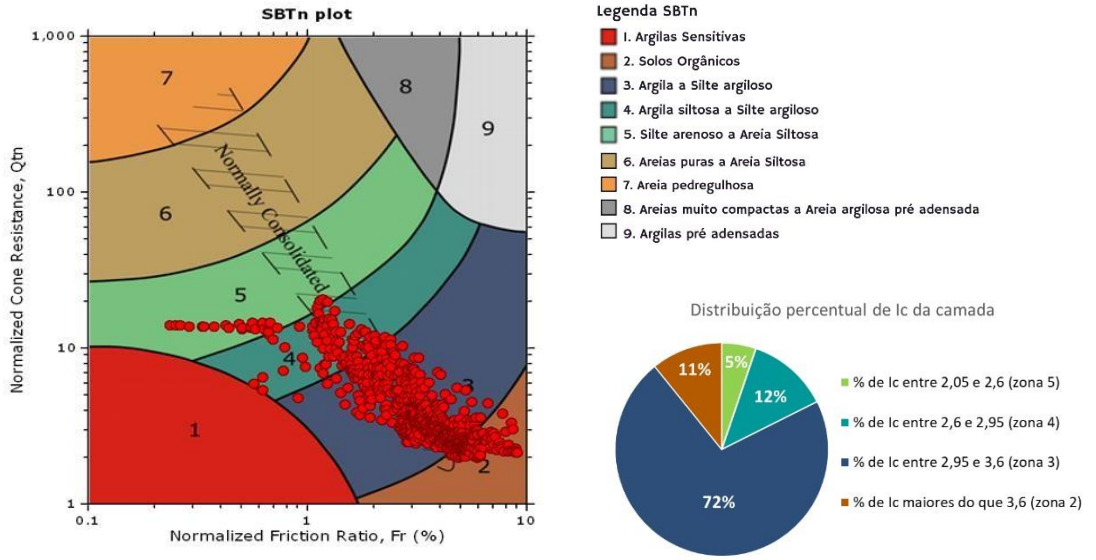
A Figura 5 compara os gráficos do índice de comportamento (I_c) entre 13,5 e 21 m (camada de rejeito com comportamento fino), revelando refinamento pós-correção com redistribuição de valores Ic e alteração nas proporções de comportamentos fino/granular.



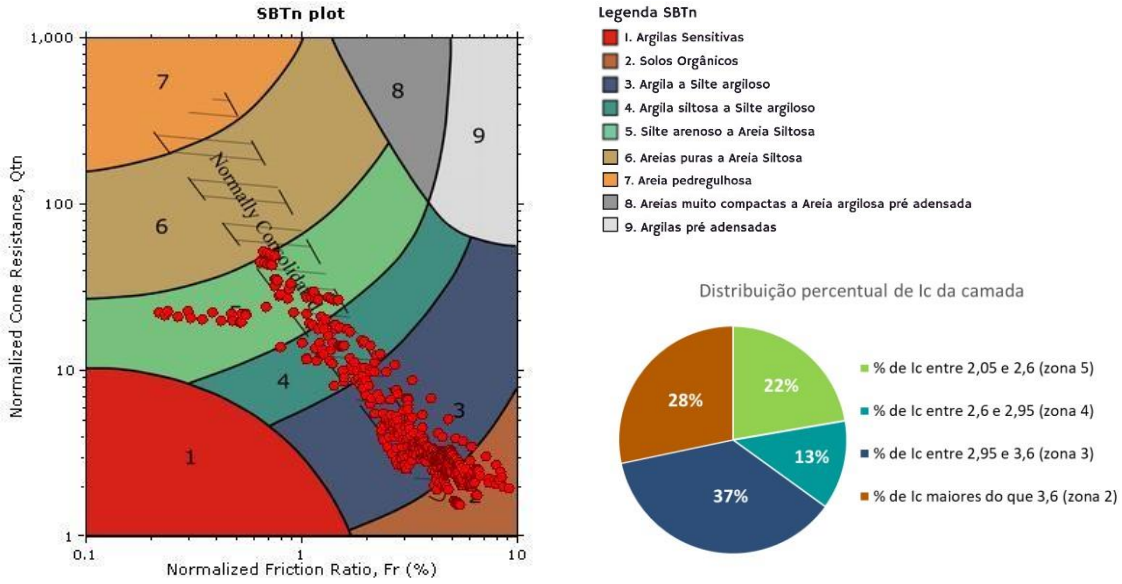
(a) (b)

Figura 5 – Variação do Índice de comportamento (I_c) da camada de rejeito com comportamento fino do CPTu-02 ao longo da profundidade (a) antes e (b) após a aplicação da metodologia de correção.

Na Figura 6(a), é possível observar que há predominância rejeito com comportamento argiloso (Região 3 do ábaco SBTn: 72%); após correção, reduz-se a 37%, com aumento de rejeitos com comportamento granular (Região 4 e 5) e orgânica (Região 2: 28%), de acordo com a Figura 6(b). Esses resultados evidenciam o impacto da metodologia na reclassificação dos materiais, permitindo uma distinção mais precisa entre os diferentes comportamentos geotécnicos presentes na camada.



(a)

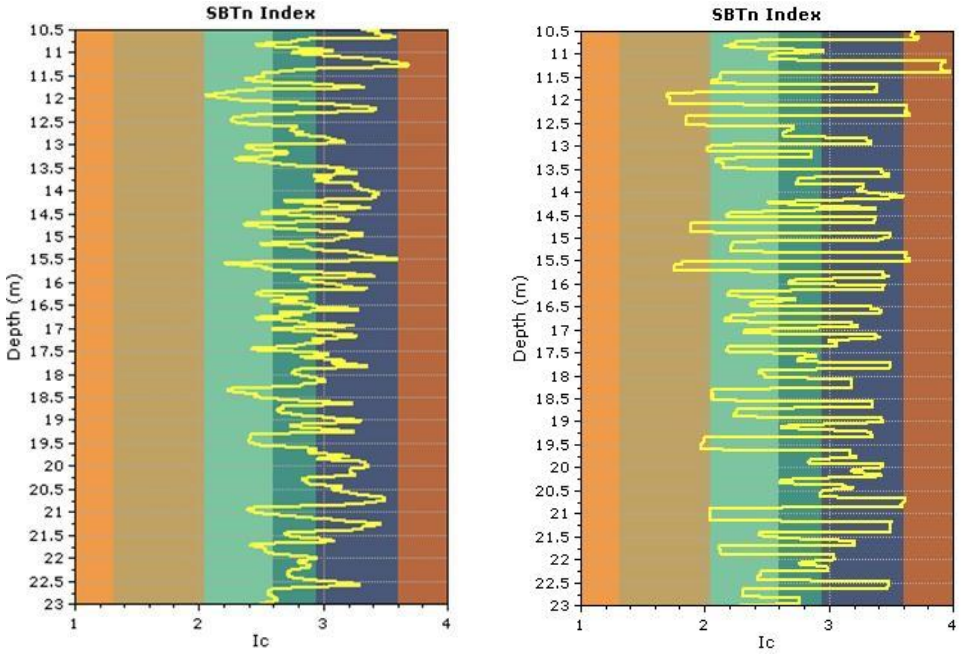


(b)

Figura 6 – Estatísticas da camada de rejeito com comportamento fino do CPTu-02 no ábaco SBTn (a) antes e (b) após a aplicação da metodologia de correção.

3.3.2 Resultados CPTu-03 – Camada de rejeito com comportamento intermediário

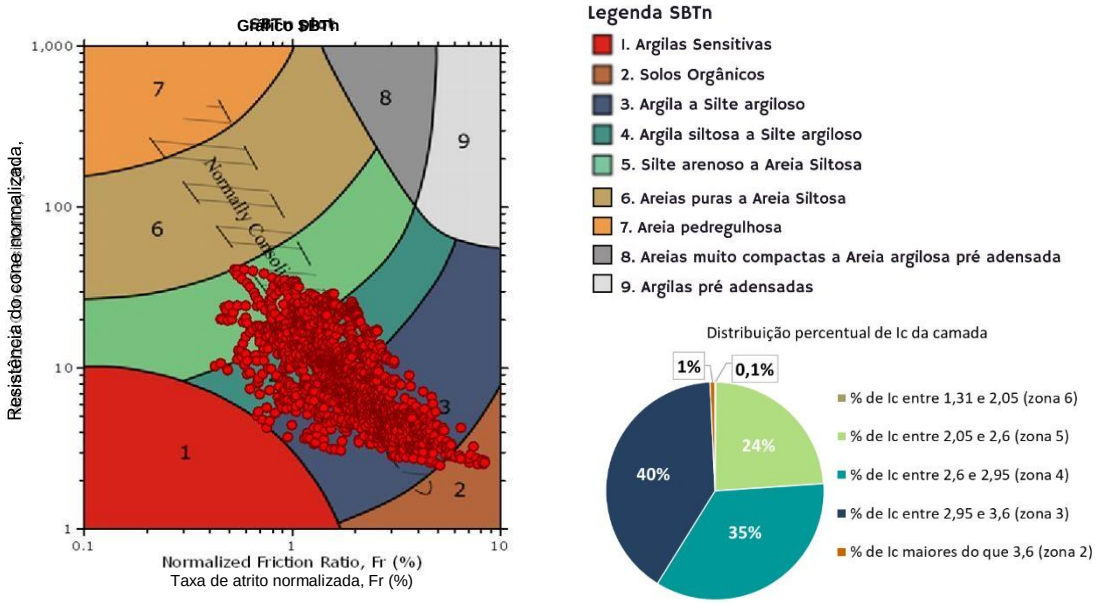
A Figura 7 compara os gráficos do índice de comportamento (I_c) entre 10,5 e 23 m (camada de rejeito intermediário, CPTu-03), evidenciando refinamento pós-correção com redistribuição de valores I_c e alterações nas proporções de comportamentos fino/granular.



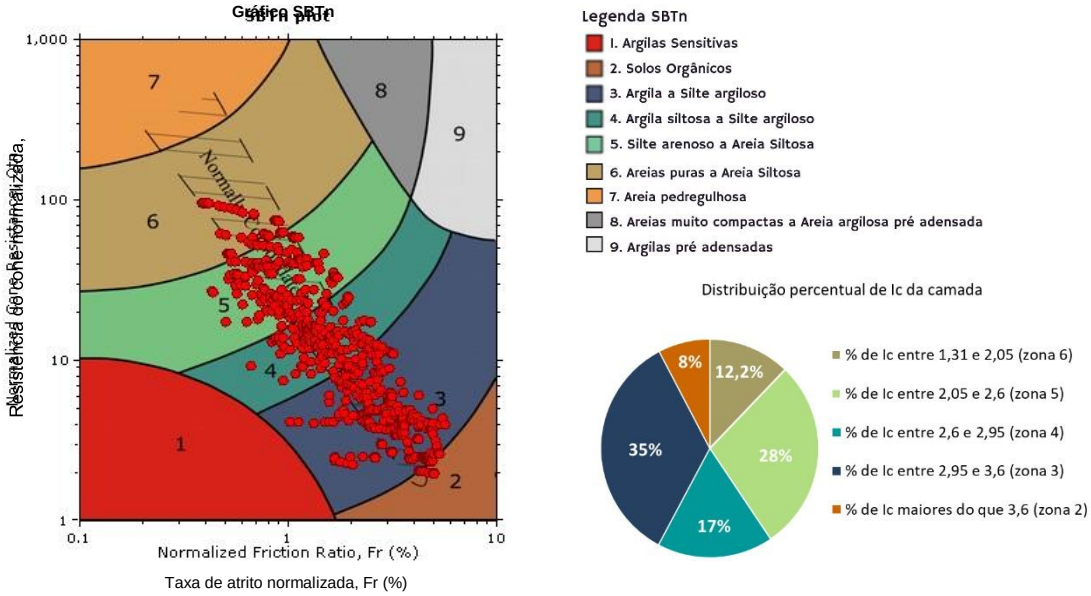
(a) (b)

Figura 7 – Variação do Índice de comportamento (I_c) da camada de rejeito com comportamento intermediário do CPTu-03 ao longo da profundidade (a) antes e (b) após a aplicação da metodologia de correção.

Na Figura 8 observa-se que antes da correção das camadas finas pela metodologia da “Filtragem Inversa”, o rejeito com comportamento intermediário distribui-se equilibradamente entre fino (região 3: 40%) e granular (regiões 4-5: 59%); e após a correção, mantém-se a proporção (fino: 35%; granular: ~65%). Porém, a região 6 do ábaco SBTn (comportamento de areias puras a siltosas) eleva-se de 0,1% para 12,2%, reinterpretando a composição da camada.



(a)

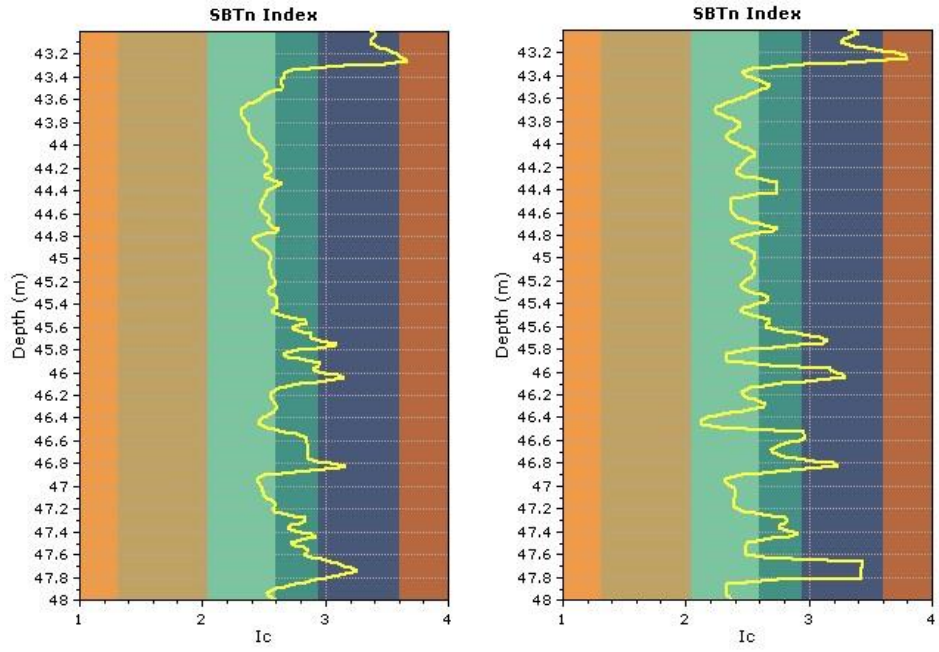


(b)

Figura 8 – Estatísticas da camada de rejeito com comportamento intermediário do CPTu-03 no ábaco SBTn (a) antes e (b) após a aplicação da metodologia de correção.

3.3.3 Resultados CPTu-06 – Camada de rejeito com comportamento granular

A Figura 9 compara os gráficos do índice de comportamento (I_c) entre 43 e 48 m (camada de rejeito granular), revelando refinamento pós-correção com redistribuição de valores Ic e alterações nas proporções de comportamentos fino/granular.



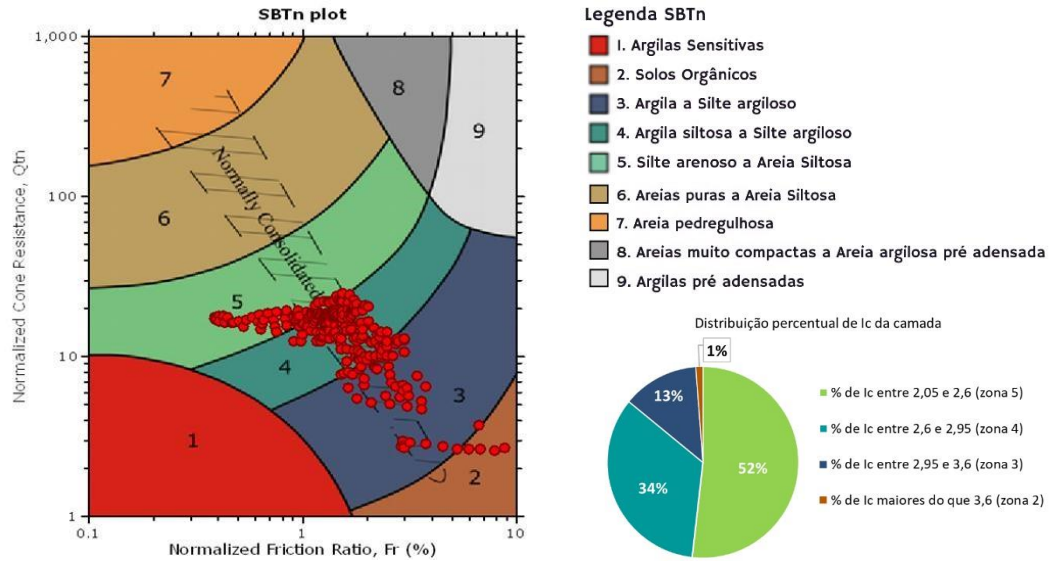
(a) (b)

Figura 9 – Variação do Índice de comportamento (I_c) da camada de rejeito com comportamento granular do CPTu-06 ao longo da profundidade (a) antes e (b) após a aplicação da metodologia de correção.

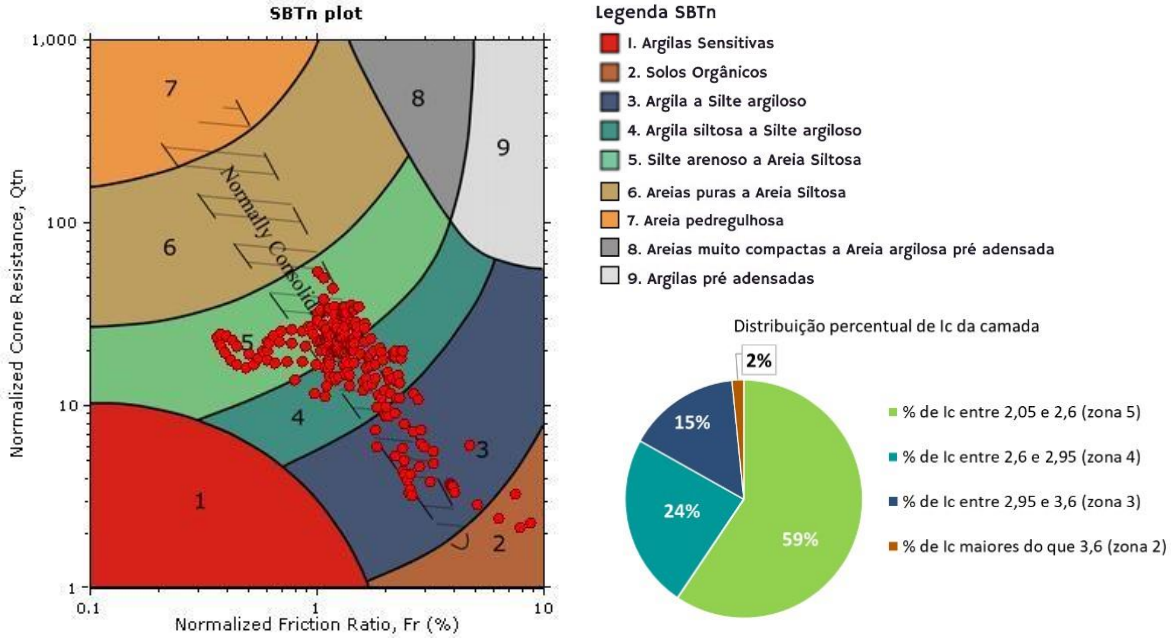
Na Figura 10(a), a distribuição original da camada de rejeito granular mostra predomínio de comportamento arenoso: 52% na região 5 e 34% na região 4. Após correção (Figura 10-b), a região 5 eleva-se a 59%, a região 4 reduz para 24%, com

aumentos sutis nas zonas 2 e 3, reforçando reclassificação para materiais mais tipicamente arenosos e menor fração fina.

Observa-se que a metodologia de correção das camadas finas por “Filtragem Inversa” provoca alterações pontuais na classificação, com menor redistribuição de Ic e refinamento na identificação de comportamentos tipicamente arenosos (região 5). A menor sensibilidade observada evidencia maior homogeneidade nos rejeitos granulares, com baixa variabilidade comportamental.



(a)



(b)

Figura 10 – Estatísticas da camada de rejeito com comportamento granular do CPTu-06 no ábaco SBTn (a) antes e (b) após a aplicação da metodologia de correção.

3.4. Análise probabilística das razões de resistência não drenada

A análise probabilística dos ensaios CPTu (CPTu-01 a CPTu-15) foi realizada com ajuste à distribuição log-normal de três parâmetros, adotando-se o percentil 20 como

valor de projeto, conforme recomendado por [15], uma vez que a utilização desse percentil como valor de resistência de projeto é especialmente indicada para solos arenosos e silto-arenosos, como forma de considerar os trechos mais suscetíveis à instabilidade.

3.4.1. Rejeito com comportamento fino

Como pode-se observar na Figura 11, para o rejeito com comportamento fino, os valores de $S_{u(pico)}/\sigma'_{v0}$ apresentaram, antes da correção, distribuição mais concentrada. Após a aplicação da metodologia de correção das camadas finas por “Filtragem Inversa”, a distribuição tornou-se mais dispersa. Embora o valor percentil 20 (P20th) não tenha sofrido variação antes e após a correção, o aumento da dispersão é em si um resultado relevante: ele evidencia porções do reservatório de rejeitos com razão de resistência de pico mais baixa do que os dados brutos sugeriam, ou seja, porções que, sem a correção, seriam subestimadas ou mascaradas pela influência das camadas finas.

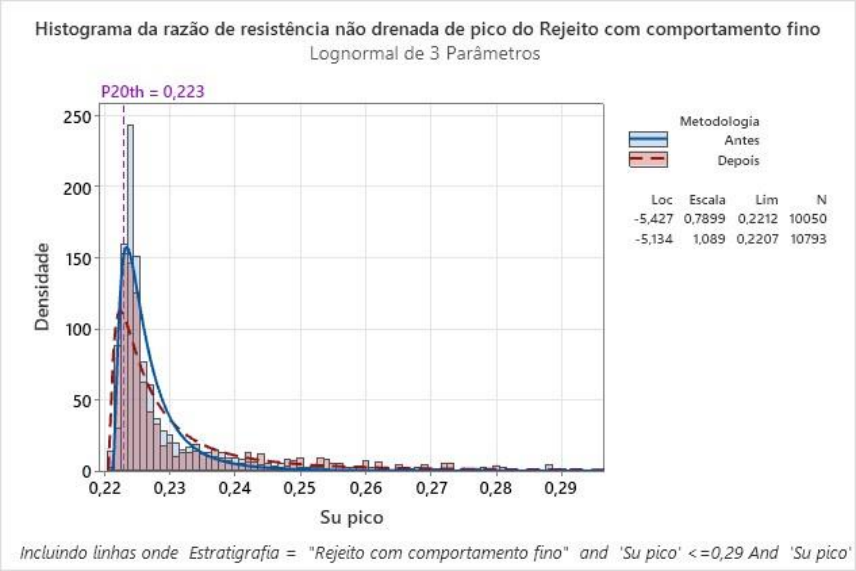


Figura 11 – Histograma da razão de resistência não drenada de pico da camada de rejeito com comportamento fino antes e depois da aplicação da metodologia de correção.

3.4.2. Rejeito com comportamento intermediário

Como pode-se observar na Figura 12, para o rejeito com comportamento intermediário, os valores de $S_{u(pico)}/\sigma'_{v0}$ apresentaram, antes da correção um percentil 20 (P20th) de 0,226, com alta densidade de frequência. Após a correção, o pico desloca-se sutilmente para 0,225, refletindo o maior grau de heterogeneidade revelado pela correção nessa camada — compatível com sua posição transicional entre materiais finos e granulares. Ainda que a variação absoluta seja pequena, o alargamento da distribuição implica que a probabilidade de ocorrência de valores baixos de $S_{u(pico)}/\sigma'_{v0}$ é maior do que indicavam os dados brutos.

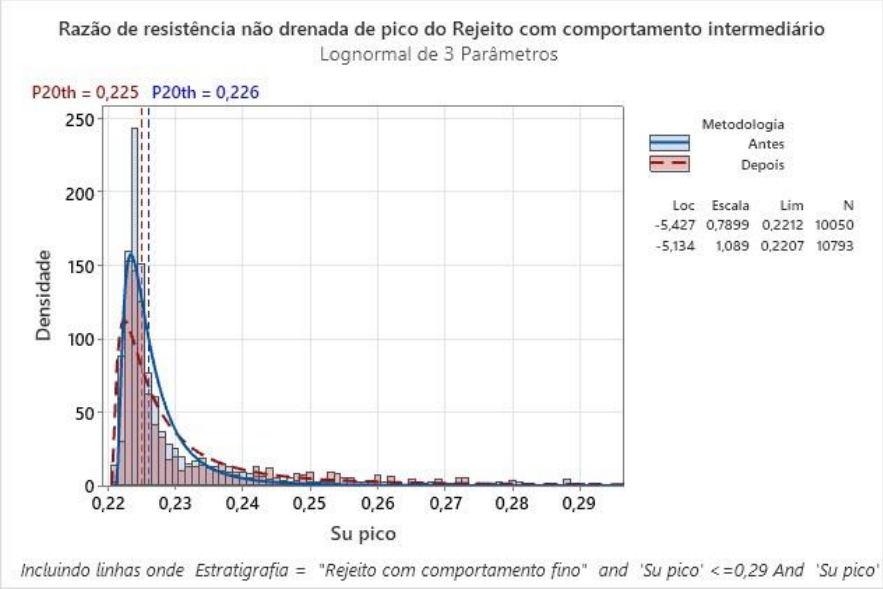


Figura 12 – Histograma da razão de resistência não drenada de pico da camada de rejeito com comportamento intermediário antes e depois da aplicação da metodologia de correção.

3.4.3. Rejeito com comportamento granular

Como pode-se observar na Figura 13, para o rejeito com comportamento granular, os valores de $S_{u(pico)}/\sigma'_{v0}$ apresentaram distribuição bimodal tanto antes quanto após a correção. Antes da correção, os dados concentravam-se predominantemente em torno da segunda moda (0,245); após a correção, a distribuição tornou-se mais homogênea entre as duas modas, com percentil 20 variando de 0,225 para 0,226. A menor sensibilidade desse material à correção é esperada e coerente com sua maior homogeneidade interna, confirmada também pela menor redistribuição de Ic observada na Figura 10.

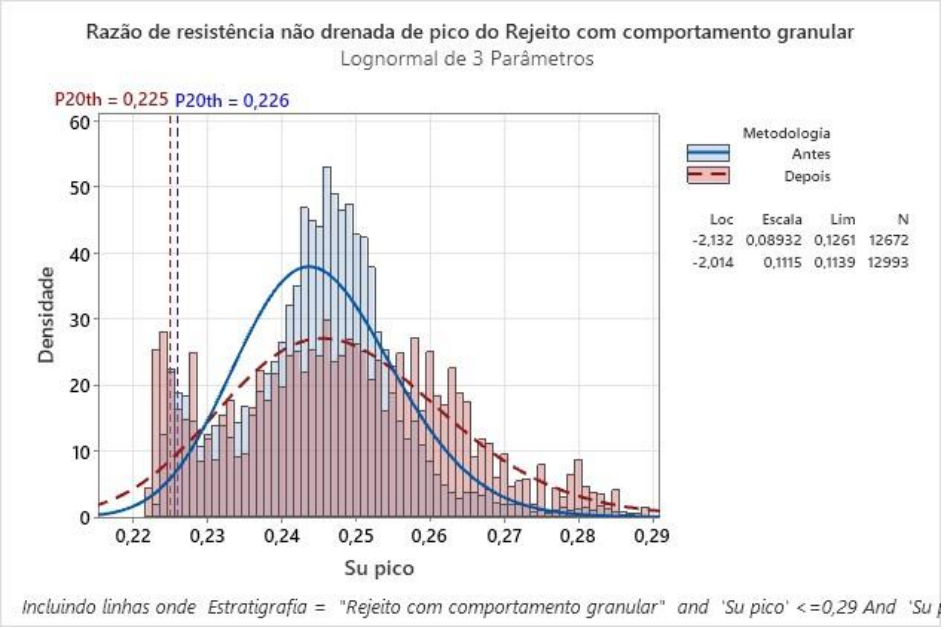


Figura 13 – Histograma da razão de resistência não drenada de pico da camada de rejeito com comportamento granular antes e depois da aplicação da metodologia de correção.

4. CONCLUSÕES

A análise dos 15 ensaios CPTu realizados reservatórios de rejeito de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero confirmou que a presença de camadas finas heterogêneas pode distorcer os parâmetros obtidos durante a cravação do cone. A aplicação do método de “Filtragem Inversa” promoveu redistribuições do Índice de comportamento do solo (Ic) demonstrando que dados não corrigidos tendem a superestimar a presença de materiais finos e subestimar a resistência das frações granulares intercaladas, comprometendo a confiabilidade da estratigrafia.

Do ponto de vista da segurança, observa-se que, embora os valores medianos da razão de resistência não drenada ($S_{u(pico)}/\sigma'_{v0}$) tenham variado pouco com a correção, o aumento consistente da dispersão das distribuições — especialmente no rejeito intermediário — revela frações do maciço com $S_{u(pico)}/\sigma'_{v0}$ inferior ao indicado pelos dados brutos. Esses dados mostram que análises de estabilidade baseadas em dados de CPTu sem correção para camadas finas podem subestimar o potencial de liquefação, sobretudo nas zonas de transição entre materiais de comportamentos distintos.

Ainda, para o avanço da temática voltada às metodologias de correção das camadas finas em rejeitos, recomenda-se realização de estudos de sensibilidade aos parâmetros do filtro para utilização da metodologia de “Filtragem Inversa” ($z'_{50,ref}$, m_z, m_{z50} e m_q), a extensão da análise probabilística aos modos de cisalhamento simples e por extensão propostos por Sadrekarimi (2014), a comparação das correções e resultados estatísticos com a metodologia de Greef e Lengkeek (2018) e a integração dos resultados com ensaios laboratoriais e com o parâmetro de estado, de modo a ampliar a base de validação das correlações empíricas em rejeitos de minério de ferro do contexto geológico brasileiro.

5. PALAVRAS-CHAVE

Ensaio CPTu; barragens de rejeito; correção de camadas finas; filtragem inversa; razão de resistência não drenada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IPEA (2023) – Ipea e MME lançam estudo sobre a extensão da cadeia produtiva da mineração no PIB brasileiro. Portal Ipea, 21 dezembro 2023.

[2] FERREIRA, R.; COSTA, W. (2020). Análise da influência de parâmetros geotécnicos na estabilidade de barragens de rejeito submetidas a carregamentos dinâmicos através do software QUAKE/W. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas, Brasil, 8 p.

[3] SADREKARIMI, A. (2014). *Effect of the mode of shear on static liquefaction analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(12).

[4] BOULANGER, R. W.; DEJONG, J. T. (2018). *Inverse filtering procedure to correct cone penetration data for thin-layer effects*. In: HICKS, M. A.; PISANÒ, F.; PEUCHEN, J. (eds.), Cone Penetration Testing 2018. Londres: CRC Press, pp. 25–44.

[5] ABGE (2024). Norma ABGE 110/2024: Investigações especiais de campo em solos – Ensaios CPTu, Vane Test e DMT. São Paulo, Brasil.

[6] CONETECH (2023). *The Cone Penetration Test: Better Information Better Decisions* – A CPT Design Parameter Manual. ConeTec, Canada.

[7] LUNNE, T.; ROBERTSON, P.K.; POWELL, J.J.M. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Londres, UK: E & FN Spon.

[8] LONG, M. et al. (2024). *Experience of In Situ Geotechnical Tests and Their Interpretation in Organic Soils and Peat*. In: 7th *International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization* (ISC'7), Barcelona, Espanha, pp. 650–657.

[9] ROBERTSON, P. K. (2009). *Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), pp. 1337–1355.

[10] ROBERTSON, P. K.; CABAL, K. (2022). *Guide to cone penetration testing – a concise and practical applications guide* (7th ed.). Londres: Robertson.

[11] ROBERTSON, P. K. (1990). *Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal*, 27, pp. 151–158.

[12] JEFFERIES, M.; DAVIES, M. (1993). *Use of CPTu to estimate equivalent SPT N60. Geotechnical Testing Journal*, 16(4), pp. 458–468.

[13] ROBERTSON, P. K.; WRIDE, C. (1998). *Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal*, 35, pp. 442–459.

[14] ROBERTSON, P.K. et al. (2019). Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão. Brasil.

[15] POPESCU, R. et al. (1997). *Effects of Spatial Variability on Soil Liquefaction: Some Design Recommendations. Géotechnique*, 47(5), pp. 1019–1036.



Julia TEIXEIRA PASSOS FERRAREZ

Julia Ferrarez é engenheira civil pela Universidade Federal de Minas Gerais, com atuação em Geotecnia aplicada à mineração e segurança de barragens. Possui experiência em monitoramento geotécnico, interpretação de instrumentação, análises de estabilidade, inspeções de campo e avaliação de segurança física e hidráulica.

	**Vinícius de CASTRO BOTELHO LANZA** Vinicius de Castro Botelho Lanza é engenheiro geotécnico com atuação na área de mineração e segurança de barragens. Possui experiência em mecânica dos solos no estado crítico, caracterização geotécnica de rejeitos, ensaios laboratoriais e de campo, interpretação de parâmetros geotécnicos, instrumentação e análises de estabilidade e liquefação de estruturas de disposição de rejeitos. Atua na Pimenta de Ávila Consultoria.
	**Ian TORRAS PAES** Ian Torras Paes é engenheiro geotécnico com atuação em mineração e segurança de barragens. Possui experiência em mecânica dos solos do estado crítico, caracterização e comportamento geotécnico de rejeitos, ensaios de campo e laboratório, interpretação de parâmetros geotécnicos e monitoramento geotécnico, bem como em liquefação de estruturas de disposição de rejeitos.
	**Lúcio FLÁVIO VILLAR** Lúcio Flávio é engenheiro civil, com doutorado em Engenharia Civil e pós-doutorado na University of Texas. É professor associado da Universidade Federal de Minas Gerais, atuando no Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia. Possui ampla experiência em geotecnia, com ênfase em ensaios de laboratório e campo, comportamento de solos não saturados e disposição de rejeitos de mineração.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.1
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

MAPEAMENTO DA CONFORMAÇÃO DE FUNDO DE JUSANTE EM ENSAIOS DE MODELOS FÍSICOS DE BARRAGENS

Lucas Fontanetti Martins
Doutorando em Engenharia Civil - Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica

Roberto de Oliveira Bezerra
Doutorando em Engenharia Civil - Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica

Alexandre Ângelo Carmo Luiz da Silva
Engenheiro Ambiental e Mestre em Recursos Hídricos - Samarco Mineração S.A.

José Rodolfo Scarati Martins
Professor Titular - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

José Carlos de Melo Bernardino
Professor Doutor - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

Os extravasores de barragens podem conduzir vazões com elevado potencial erosivo para o leito a jusante, que podem gerar impactos ambientais e até mesmo danos estruturais à própria barragem. Isso reforça a importância de estudos de engenharia para compreensão e mitigação desses efeitos a jusante. Modelos físicos hidráulicos em escala reduzida são amplamente utilizados para avaliar esse potencial por meio de ensaios com representação do leito por material solto, ou seja, que pode ser movimentado pela ação do escoamento, denominados de ensaios de fundo móvel. Avanços recentes nesse tipo de ensaio tratam de técnicas para se mapear a conformação final do fundo após cada cenário simulado. Entretanto, métodos modernos exigem aplicação de instrumentação de alto custo, o que torna inviável o emprego em diversos laboratórios. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma abordagem alternativa, de baixo custo, para realização deste mapeamento, com a acurácia necessária para possibilitar inferências confiáveis sobre a conformação de fundo no ambiente real. O método proposto foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e consiste na geração de modelo digital da conformação de fundo em modelos reduzidos, por meio de imagens, capturadas por câmeras, que são pós-processadas de forma integrada com dados de sensores capacitivos de nível d'água. Os resultados obtidos foram promissores, mostrando bom nível de aderência com as técnicas tradicionais de levantamentos diretos das cotas de fundo em modelos físicos, além do método proposto possuir a vantagem de ser muito mais rápido para execução e possibilitar um mapeamento mais completo.

ABSTRACT

Dam spillways may convey flows with high erosive potential to the downstream riverbed, which can generate environmental impacts and even structural damage to the dam itself. This reinforces the importance of engineering studies for the understanding and mitigation of these downstream effects. Scaled hydraulic physical models are widely used to assess this potential through experiments with the representation of the bed by loose material, that is, material that can be mobilized by the action of the flow, known as movable-bed experiments. Recent advances in this type of experiment involve techniques to map the final bed configuration after each simulated scenario. However, modern methods require the use of high-cost instrumentation, which makes their application unfeasible in many laboratories. In this context, the present study presents an alternative, low-cost approach for carrying out this mapping, with the accuracy required to enable reliable inferences about bed configuration in real-world conditions. The proposed method was developed at the Hydraulics Laboratory of the Engineering School of the University of Sao Paulo and consists of generating a digital model of bed configuration in scaled physical models through images captured by cameras, which are post-processed in an integrated manner with data from capacitive water level sensors. The results obtained were promising, showing a good level of agreement with traditional techniques for direct surveying of bed elevations in physical models, in addition to the proposed method having the advantage of being much faster to execute and allowing for a more comprehensive mapping.

1. INTRODUÇÃO

Os extravasores de barragens podem veicular vazões com grande potencial erosivo para o leito do curso d'água a jusante, resultando em impactos ambientais significativos e danos à própria estrutura da barragem [1]. Por este motivo, estudos para previsão e mitigação de tais efeitos são fundamentais para garantir a segurança de obras de engenharia. Para isso, as melhores ferramentas atualmente disponíveis são os modelos hidráulicos, termo este que, na Engenharia Hidráulica, é empregado para descrever uma simulação física ou matemática de um "protótipo", na qual é possível prever os efeitos hidráulicos de um projeto proposto [2].

Os modelos físicos reduzidos e computacionais são amplamente empregados em projetos de Engenharia Hidráulica, especialmente nos casos em que há escoamentos com maior grau de complexidade, tal como na região de restituição do escoamento de uma estrutura hidráulica ao leito natural do rio. Entretanto, nestes casos, para uma representação fidedigna do escoamento em modelos computacionais, é necessário um alto nível de refinamento das malhas e, consequentemente, grande capacidade computacional, o que torna os tempos de simulação excessivamente longos. Esta limitação se torna ainda mais severa quando o transporte de sedimentos precisa ser considerado. Para contornar isso, são necessárias limitações ou simplificações na representação do problema, o que pode não ser possível em muitos casos práticos de engenharia [3].

Nesse contexto, os modelos físicos em escala reduzida se destacam como ferramentas amplamente empregadas na avaliação do potencial erosivo do fluxo a jusante de barragens. Os princípios teóricos fundamentais para a construção desses modelos foram estabelecidos por diversos pesquisadores no passado [2, 4, 5] e, desde então, os avanços na modelagem têm se concentrado nas ferramentas e técnicas de medição, aquisição e processamento de dados [6].

Nos últimos anos, diferentes técnicas têm sido empregadas para o levantamento da conformação de fundo em modelos físicos hidráulicos, com destaque para métodos baseados em varredura a laser *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) e fotogrametria, esta última definida como a técnica de reconstrução tridimensional de superfícies a partir de imagens obtidas sob diferentes pontos de vista. Ambas as técnicas permitem a obtenção de Modelos Digitais de Terreno (MDT) com alta resolução espacial e elevada precisão na representação da topobatimetria do leito, sendo amplamente utilizados em estudos experimentais de morfodinâmica [7, 8, 9, 10].

Entretanto, medições por varredura a laser terrestre (TLS) requerem equipamentos de alto custo, o que se torna ainda mais crítico à medida que aumenta a precisão requerida, uma vez que equipamentos mais precisos tendem a apresentar custos mais elevados. Diante disso, técnicas baseadas em fotogrametria têm se consolidado como alternativas mais acessíveis para o levantamento de superfícies em modelos físicos [11].

Avanços recentes nas áreas de fotogrametria e visão computacional têm permitido melhorias significativas na extração automatizada de informações tridimensionais a partir de imagens bidimensionais. Dentre as técnicas de fotogrametria, destacam-se os métodos baseados em *Structure-from-Motion* (SfM), que permitem a reconstrução tridimensional da superfície a partir da sobreposição de imagens 2D, resultando em

modelos densos e com boa acurácia geométrica [6, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Diversos estudos indicam que, quando adequadamente aplicados, esses métodos podem produzir resultados comparáveis aos obtidos por técnicas baseadas em *laser scanning* [13, 14, 18].

Apesar dessas vantagens, a aplicação do SfM não é isenta de limitações. O método envolve etapas de processamento computacional relativamente complexas e requer o atendimento a condições específicas de aquisição das imagens. A qualidade da reconstrução está diretamente associada à geometria e à cobertura do conjunto de imagens, sendo necessário garantir elevada sobreposição e adequada distribuição espacial dos pontos de vista, de modo que as feições do terreno sejam identificadas em múltiplas imagens (tipicamente, ao menos três) [14]. Além disso, superfícies com baixa variabilidade de textura ou coloração uniforme podem dificultar a identificação de pontos característicos, comprometendo a qualidade da reconstrução [6, 14].

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta um método alternativo para o mapeamento da conformação de fundo em modelos físicos hidráulicos, desenvolvida no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, conhecido como Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH-USP), a partir de adaptações de procedimentos historicamente utilizados no laboratório. O método proposto baseia-se na integração de registros fotográficos bidimensionais, obtidos em vista zenital, com medições pontuais de nível d'água obtidas por sensores capacitivos. A abordagem proposta deriva de estudos anteriores conduzidos no CTH-USP, nos quais essa técnica foi aplicada à investigação de um quebra-mar sob a ação de ondas em um canal bidimensional [19], sendo, no presente trabalho, adaptada para aplicação em ensaios de fundo móvel de modelo reduzido tridimensionais de uma barragem.

O estudo de caso contempla a avaliação do potencial erosivo associado à restituição do escoamento de um extravasor de um canal de drenagem de uma barragem de rejeito no leito natural do rio, para dois diferentes cenários ambientais extremos. O objetivo principal é apresentar o método proposto, discutir sua acurácia e sua aplicabilidade em estudos deste tipo.

2. MÉTODO

2.1 Estudo de caso

2.1.1. Descrição do modelo físico

Neste estudo, os ensaios foram realizados em um modelo físico hidráulico em escala geométrica não-distorcida 1:40, que representa a região de restituição do escoamento proveniente de um canal de drenagem de uma barragem de mineração ao leito natural do rio. O modelo físico construído possui dimensões em planta de 7,48 m x 5,00 m (Figura 2.1). Neste artigo, todas as dimensões e grandezas físicas do escoamento foram reportadas na escala do modelo.

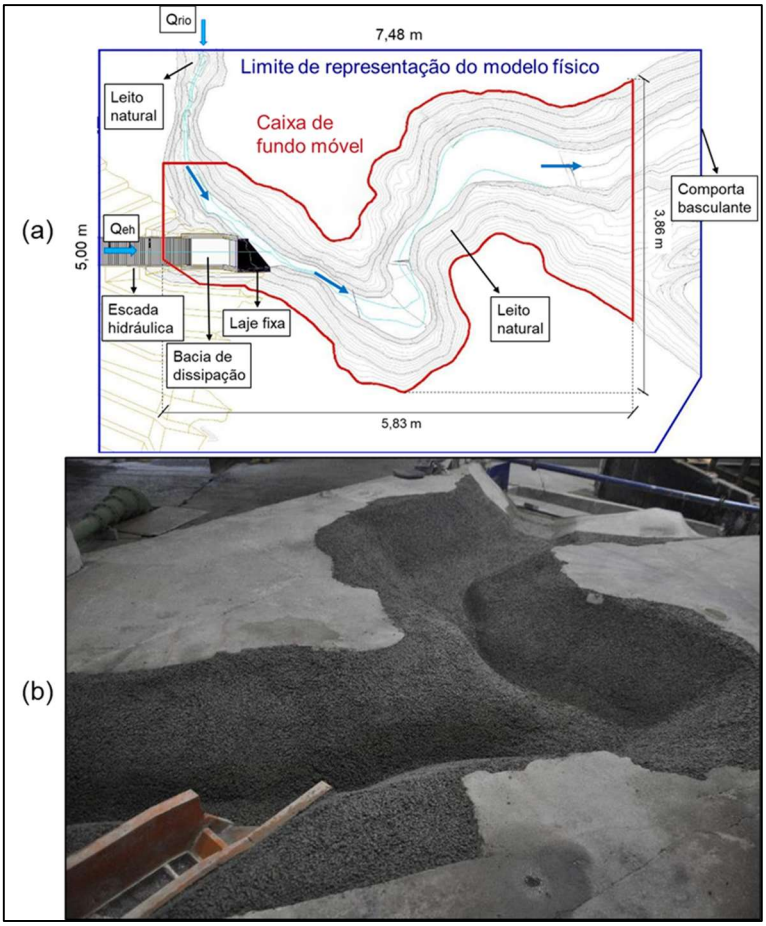


Figura 2.1 – Modelo físico em escala reduzida 1:40 construído para os ensaios em fundo móvel. (a) Esquema das estruturas e da batimetria do leito natural do rio implementada no modelo físico, com a seta azul indicando o sentido do escoamento. (b) Foto da topobatimetria implementada no modelo com vista de montante para jusante. Fonte: acervo CTH-USP.

O modelo é alimentado por duas entradas independentes de vazão, uma correspondente ao escoamento do rio (Q_{rio}) e outra associada à estrutura hidráulica (Q_{eh}), ambas dotadas de vertedores triangulares com precisão de 0,1%. A descarga proveniente da estrutura hidráulica é conduzida por uma escada hidráulica, com largura de 32,5 cm, altura de 2 m e declividade de 26,56%. A jusante da escada, foi implantada uma bacia de dissipação do tipo I (fundo plano) com *end-sill*, conforme a classificação proposta por Peterka [20], com comprimento de 48,1 cm e largura de 32,5 cm. Essa estrutura tem como finalidade promover a dissipação da energia do escoamento antes de sua restituição ao leito natural. Imediatamente a jusante da bacia, instalou-se uma laje fixa, com dimensões de 40 cm x 32,5 cm.

No modelo, foi representado um trecho do leito do rio com extensão aproximada de 7 m, com comporta basculante na seção mais a jusante, para controle de nível d'água. A região considerada mais suscetível a processos erosivos foi modelada em fundo móvel, abrangendo uma área de 5,83 m x 3,86 m, onde foram realizados os levantamentos de conformação de fundo (Figura 2.1). O limite de representação da superfície suscetível à erosão foi definido como plano horizontal de referência (cota zero).

2.1.2. Ensaios realizados

Foram avaliados dois cenários ambientais distintos (Tabela 2.1), os quais conferiram diferentes condições de operação da bacia de dissipação:

- **Cenário 1:** foram consideradas as vazões que seriam formadas pela Precipitação Máxima Provável (PMP) nas bacias hidrográficas do rio e da estrutura hidráulica;
- **Cenário 2:** considerou a vazão apenas pela estrutura hidráulica, também correspondente à PMP.

Em ambos os cenários, o nível d'água de jusante foi imposto na EL. 25 cm e a duração total do ensaio foi de 6 horas. As condições adotadas em cada caso estão resumidas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Cenários ambientais ensaiados.

Cenário	Q_{rio} (L/s)	Q_{eh} (L/s)	Controle de $NA_{jusante}$ (cm)	Tempo de ensaio (h)
1	21,34	21,25	25	6
2	0	21,25		

Estes cenários foram definidos para avaliar o funcionamento da estrutura hidráulica em sob condições extremas de operação. No Cenário 1, há uma maior vazão no trecho do rio a jusante do sistema extravasor da barragem, o que irá gerar maiores tensões de cisalhamento atuando sobre o leito. Em contrapartida, no Cenário 2, a redução da vazão pelo rio, reduz também o nível d'água na região a jusante da bacia de dissipação, impossibilitando a formação de ressalto hidráulico em seu interior, o que resulta na projeção de um jato d'água de alta energia diretamente sobre a margem esquerda do rio, aumentando significativamente o potencial erosivo no local de impacto do jato.

2.1.3. Considerações sobre o material que compõe o fundo móvel

No presente estudo, o leito do rio foi representado por material erodível não-granular para a representação de fundo móvel coesivo. O material utilizado nos ensaios foi composto por cimento, areia fina, pedrisco, bentonita e água, na proporção 1:40:160:4:28 (respectivamente), com tempo de cura de 20 horas.

Vale destacar que a definição de materiais representativos de sedimentos coesivos é um dos principais desafios da modelagem hidráulica, tanto em abordagens físicas quanto computacionais [21, 22, 23]. Diferentemente de sedimentos não-coesivos, cuja resistência às ações do escoamento é majoritariamente governada pelo peso próprio do grão (materiais granulares), os sedimentos coesivos são caracterizados pelo comportamento de conjunto, ou seja, as forças eletroquímicas entre as partículas sólidas é que garantem a resistência ao escoamento. Por este motivo, a resposta de materiais coesivos às ações do escoamento é altamente sensível às suas propriedades físicas e reológicas, sendo diretamente influenciada por parâmetros como densidade, conteúdo de finos e estrutura interna do sedimento [22, 24].

Como consequência, não existe um material padrão universalmente aplicável para a representação de leitos coesivos em modelos reduzidos, sendo frequentemente necessário o desenvolvimento de composições artificiais ajustadas ao estudo de caso. Dessa forma, em aplicações práticas de engenharia, a definição do material de fundo é realizada de forma empírica, fundamentando-se na experiência do laboratório e da projetista na representação das características do material real, e considerando-se os objetivos do estudo, buscando-se assim uma representação fisicamente consistente para os processos de erosão e deposição envolvidos.

O estudo desenvolvido para definição de traço coesivo vai além do escopo deste trabalho, que se limita à avaliação do método para mapeamento de fundo móvel em ensaios de modelos físicos.

2.2 Descrição do método de imagem

Tradicionalmente, o levantamento de fundo móvel em modelo físico é realizado após o final da simulação de um dado cenário de vazão, sem escoamento (área modelada preenchida com água parada), a partir da redução controlada do nível d'água em etapas discretas, em que a posição da superfície livre é conhecida a cada estágio. A partir de uma dada condição de nível d'água estático, a interseção entre a superfície livre e o fundo é identificada manualmente, com o auxílio de elementos físicos, como barbantes, permitindo o delineamento das curvas de nível correspondentes a cada valor de cota (Figura 2.2). Embora eficaz, esse procedimento apresenta limitações operacionais, sobretudo em termos de tempo de execução e dependência da atuação de equipe experiente, de modo a mitigar os riscos de introduzir interferências na própria configuração do fundo durante o procedimento.

No método apresentado neste artigo, o princípio da técnica para a identificação das curvas de nível é preservado, ou seja, utiliza-se o nível d'água em diferentes elevações para definir os contornos, porém são integradas técnicas modernas de aquisição e processamento de imagens para automatização do processo, conforme ilustrado na Figura 2.3. A técnica consiste em capturar fotos zenitais, de forma contínua e automática, durante um esvaziamento lento do modelo físico (utilizando-se um sistema de drenos de fundo), que permite o mapeamento dos contornos 2D ("x" e "y"), e combiná-las com dados de nível d'água fornecidos por sensores de nível devidamente calibrados, para se obter a posição dos contornos em "z". As imagens 2D, então, são sobrepostas umas às outras para a formação de uma superfície 3D [19].

Essa técnica apresenta vantagens relevantes, pois aproveita uma etapa já existente do procedimento experimental (esvaziamento lento do modelo físico após a conclusão de um ensaio) para o levantamento de fundo, reduzindo o tempo operacional pós-ensaio e eliminando a necessidade de intervenção manual para caracterização das curvas de nível. Além disso, os equipamentos necessários para a aplicação do método são de fácil acesso, sendo estes: câmeras fotográficas e sensores de nível d'água, que são de uso rotineiro em laboratórios de hidráulica especializados em modelagem física.

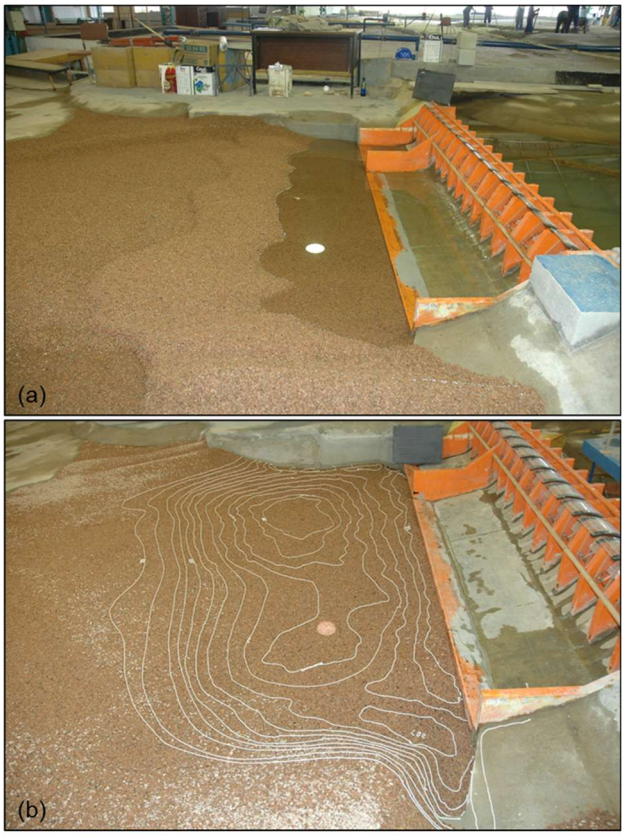


Figura 2.2 – Método tradicional para levantamento da configuração de fundo móvel em modelos físicos reduzidos. (a) Nível d'água estático mantido em uma elevação conhecida para aferição da respectiva curva de nível. (b) Identificação final das curvas de nível (com barbantes) para diferentes cotas. Fonte: acervo CTH-USP.

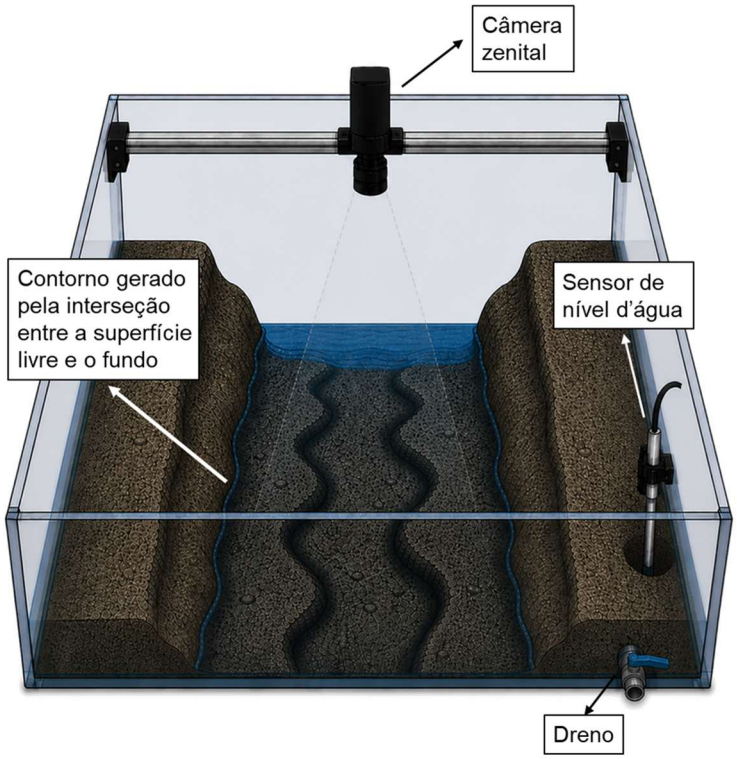


Figura 2.3 – Ilustração conceitual apresentando o método de imagem descrito neste trabalho. Imagem elaborada com auxílio de ferramenta de inteligência artificial generativa.

2.3 Sistema de aquisição de dados

A aquisição dos dados foi realizada ao final de cada ensaio por meio de um sistema automatizado (software personalizado desenvolvido em LabVIEW®), responsável por integrar o registro das imagens com as medições de nível d'água ao longo do esvaziamento do modelo físico (Figura 2.4). Nesse sistema, cada imagem capturada é associada aos valores instantâneos de nível d'água medidos pelos sensores, permitindo a construção de uma base de dados sincronizada entre as informações no plano da imagem (2D) e a coordenada vertical ("z"). Para cada ensaio, a aquisição das imagens foi programada em intervalos correspondentes a reduções de 1,25 cm no nível d'água.



Figura 2.4 – Interface do software de aquisição de dados dos sensores e imagens das câmeras.

As imagens azimutais foram obtidas por meio de câmera Microsoft LifeCam® Cinema, com resolução de 1280 × 720 pixels, posicionada acima do modelo físico a uma distância aproximada de 10 m, de forma a abranger toda a área de interesse. O nível d'água foi monitorado por dois sensores capacitivos (SN1 e SN2) com 70 cm de comprimento desenvolvidos pelo CTH-USP, com precisão de ± 0,05 mm, posicionados a aproximadamente 4 m de distância entre si (Figura 2.5). A utilização de dois sensores permite captar variações espaciais do nível d'água durante o esvaziamento do modelo, uma vez que esse processo não ocorre de maneira perfeitamente uniforme ao longo do domínio. Para a definição do nível d'água instantâneo, adotou-se a média entre as leituras dos sensores (a diferença de leituras entre os sensores tende a ficar menor quanto mais lento for o esvaziamento do modelo físico).

As imagens obtidas foram posteriormente submetidas a etapas de pós-processamento. Inicialmente, realizou-se o georreferenciamento com base em pontos de controle com coordenadas conhecidas *Ground Control Point* (GCP), por meio de uma transformação projetiva. Esse procedimento estabelece a correspondência entre o sistema de coordenadas da imagem e o sistema físico do modelo, permitindo a conversão das medidas para unidades métricas e garantindo a coerência espacial dos dados. Para tal, foram utilizados cinco GCPs (P1 a P5) distribuídos ao longo do modelo físico (Figura 2.5), atendendo ao mínimo recomendado na literatura [13].

Ressalta-se que, além da quantidade, a distribuição espacial dos pontos exerce influência direta na qualidade do ajuste geométrico.

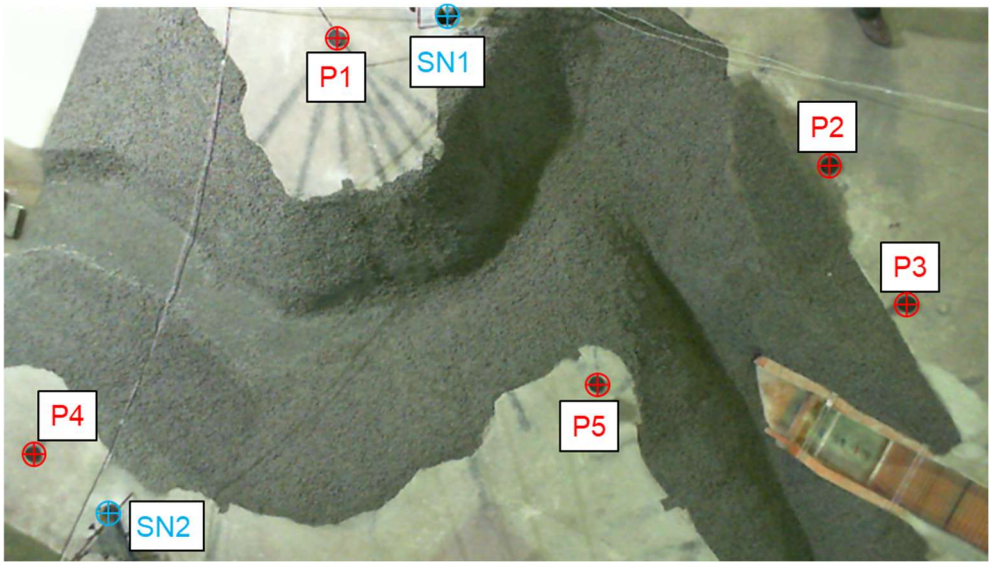


Figura 2.5 – Localização dos Sensores de Nível (SNs) e dos pontos de controle para georreferenciamento (GCPs).

Após o georreferenciamento, as imagens foram processadas com o objetivo de evidenciar a interface entre a superfície livre e o fundo, bem como identificar automaticamente a linha correspondente ao contato água-fundo. Associada aos níveis registrados pelos sensores, essa linha representa, para cada imagem, uma curva de nível associada ao valor do nível d'água medido. A Figura 2.6 apresenta as etapas do processamento digital das imagens para a obtenção dessa curva de nível, conforme descrito a seguir: a) imagem original; b) aplicação do georreferenciamento; c) aplicação de máscara nas regiões que não são de interesse, seguida de tratamento de cores, de modo a acentuar o contraste da água e o solo; d) binarização da imagem, com o objetivo de separar corpo d'água com base nos valores de pixels; e) obtenção do contorno do corpo d'água.

Por fim, a superfície do fundo foi reconstruída a partir do empilhamento dessas curvas de nível. As curvas foram interpoladas no software ArcGIS® utilizando o método Natural Neighbor, resultando na geração de um Modelo Digital de Terreno (MDT) representativo da topografia do leito após os ensaios. A Figura 2.7 apresenta um exemplo das curvas obtidas pelo algoritmo, que são utilizadas como dados de entradas para a construção do MDT.

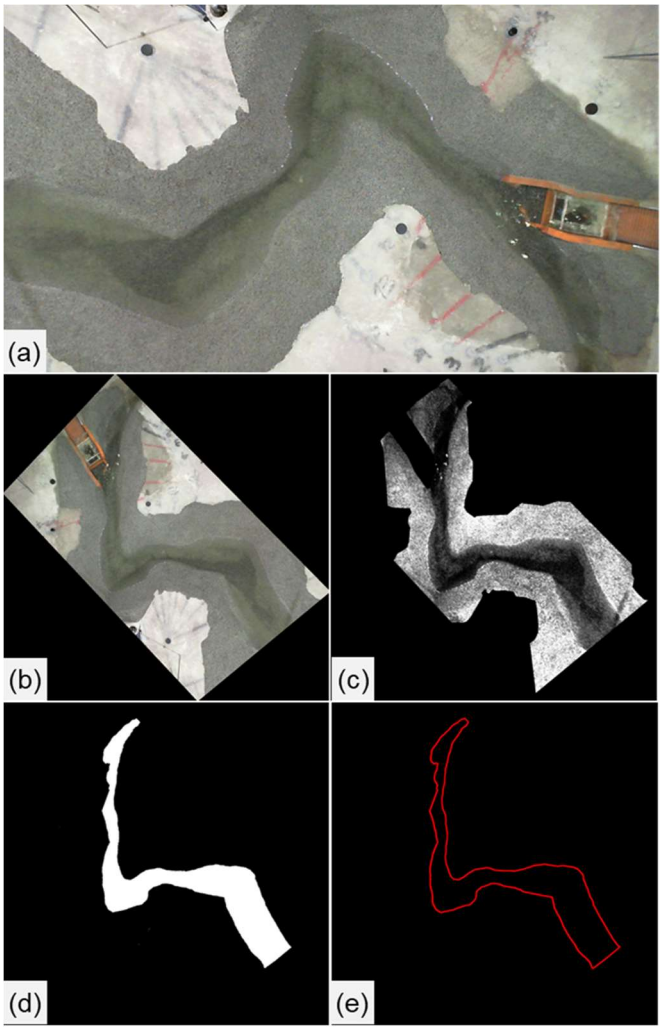


Figura 2.6 – Etapas do processamento digital para obtenção das curvas de nível.

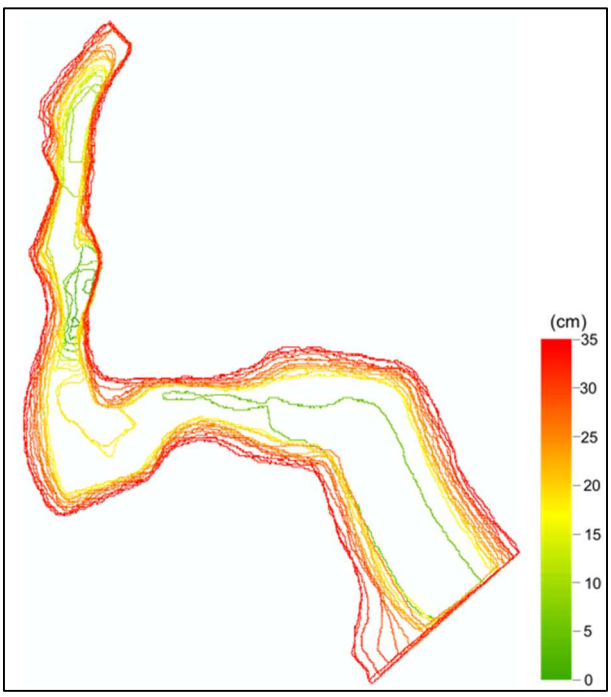


Figura 2.7 – Curvas de nível geradas após o processamento das imagens aquisitadas no modelo físico.

3. RESULTADOS

3.1 Aquisição dos dados

A Figura 3.1 mostra o gráfico do nível d'água registrado durante a etapa de mapeamento da conformação de fundo, ao fim dos ensaios, para ambos os cenários analisados. Os níveis d'água máximos e mínimos registrados foram de 33,0 cm e 0,5 cm, respectivamente, definindo, assim, os limites de reconstrução do MDT em cada cenário.

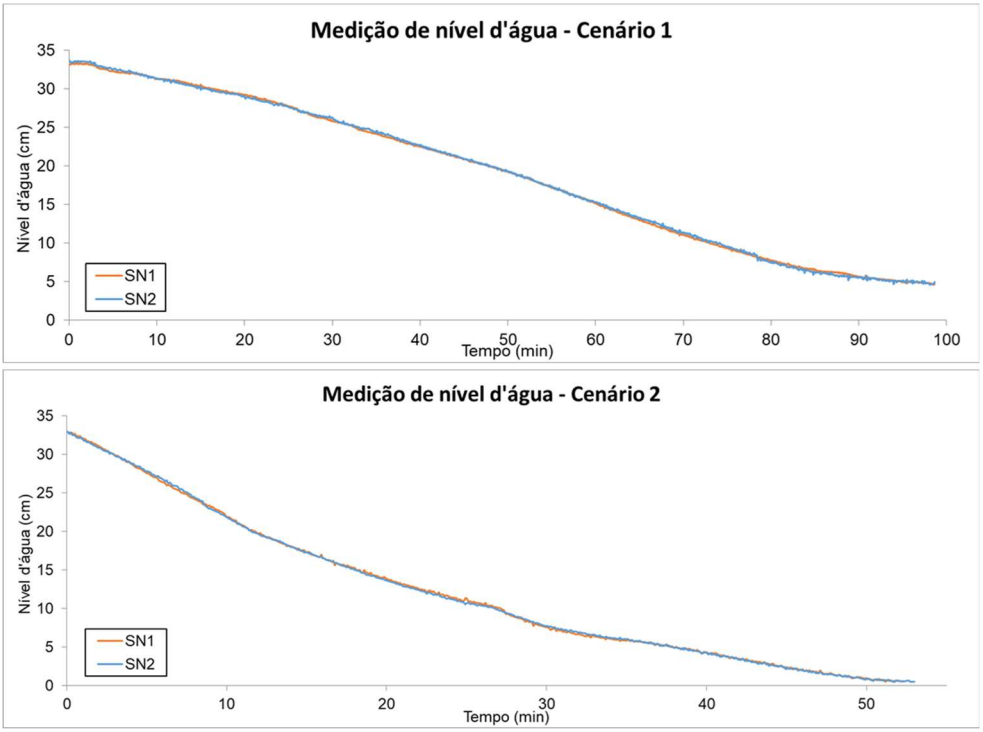


Figura 3.1 – Níveis d'água medidos pelos sensores de nível (SN1 e SN2) durante o processo de esvaziamento do modelo reduzido e captura de imagens.

A Tabela 3.1 reúne os principais parâmetros e resultados associados à etapa de aquisição e processamento dos dados em cada ensaio. Para o nível d'água, são apresentados os desvios entre as medições dos sensores SN1 e SN2. Para o processo de georreferenciamento das imagens, são apresentadas as resoluções espaciais do sistema de aquisição, determinadas a partir do posicionamento dos GCPs no plano de medição XY. Admitindo-se a resolução espacial das imagens como ±0,5 pixel em ambas as direções, essa grandeza corresponde à incerteza de quantização na localização dos pontos no plano da imagem, ou seja, o menor valor, em milimetros que o sistema é capaz de discriminar.

Tabela 3.1 – Desvios obtidos durante as medições de nível d'água e o georreferenciamento da imagem.

Ensaio	Medição de nível d'água			Número de imagens aquisitadas	Georreferenciamento das imagens	
	Tempo de aquisição (min)	(*) Desvio absoluto médio (mm)	Desvio padrão (mm)		Resolução X (mm)	Resolução Y (mm)
Cenário 1	98	1,80	1,23	23	2,25	2,25
Cenário 2	53	2,56	1,80	27		

(*) Desvios entre as medições de SN1 e SN2 em cada instante de tempo

3.2 Configuração dos MDTs gerados

Os MDTs correspondentes à configuração inicial do fundo e aos resultados obtidos em cada ensaio, acompanhados de suas respectivas imagens ilustrativas, são apresentados na Figura 3.2 e na Figura 3.3, respectivamente. Com o objetivo de facilitar a análise comparativa das alterações no fundo, foram definidas duas seções transversais (Seções 1 e 2), posicionadas nas regiões onde se observaram as maiores variações, além de um perfil longitudinal ao longo do talvegue do rio. Os perfis extraídos para as seções transversais e para o eixo longitudinal são apresentados na Figura 3.4 e na Figura 3.5, respectivamente.

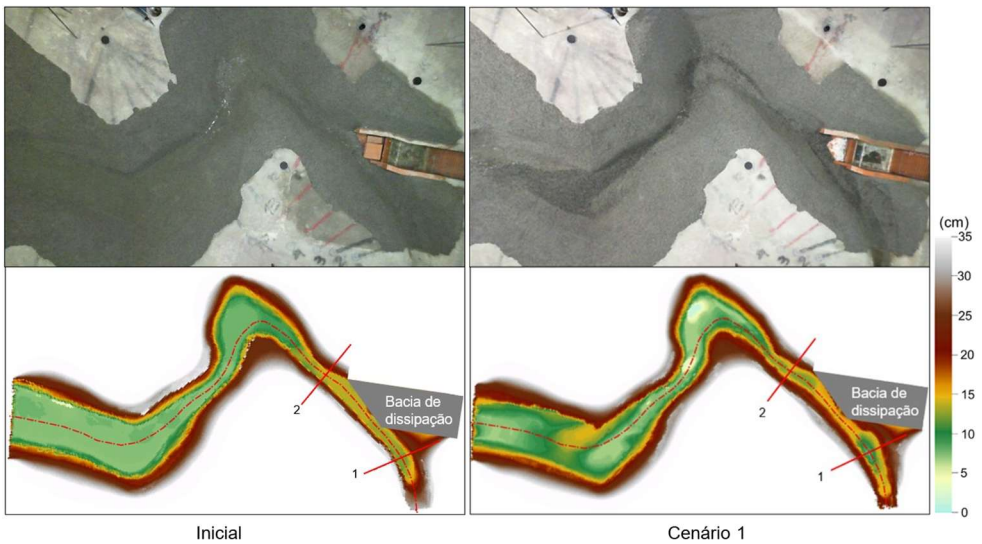


Figura 3.2 – Condição inicial (esquerda) e final (direita) de fundo após 6 h de simulação do Cenário 1. Foto ilustrativa do modelo reduzido (acima) e MDT gerado (abaixo).

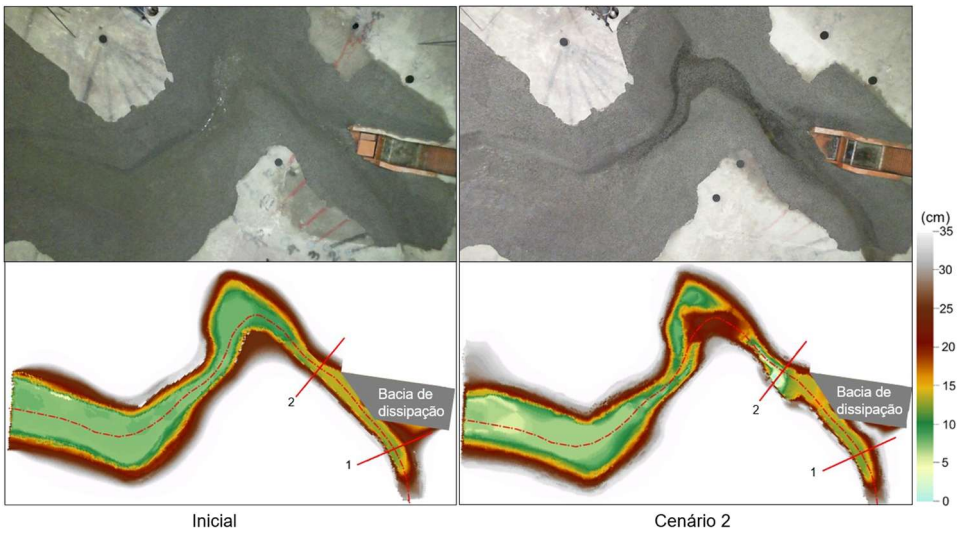


Figura 3.3 – Condição inicial (esquerda) e final (direita) de fundo após 6 h de simulação do Cenário 2. Foto ilustrativa do modelo reduzido (acima) e MDT gerado (abaixo).

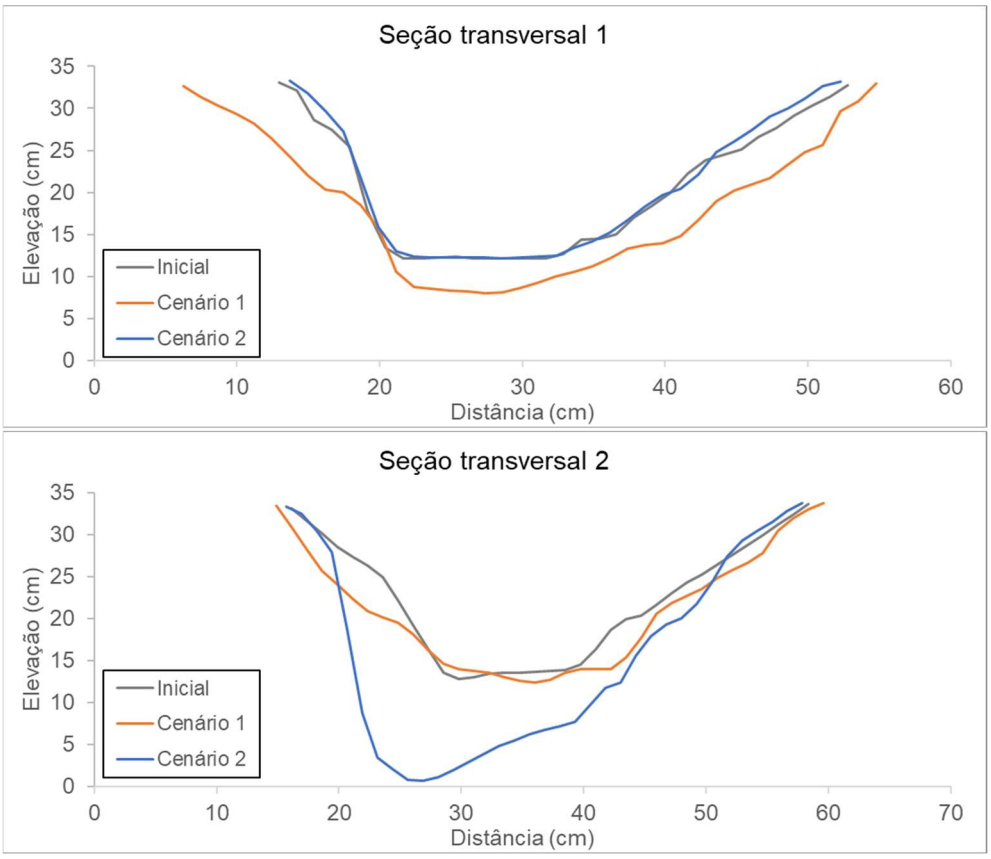


Figura 3.4 – Comparação das seções transversais 1 e 2 para a condição inicial (cinza), condição final do Cenário 1 (laranja) e condição final do Cenário 2 (azul).

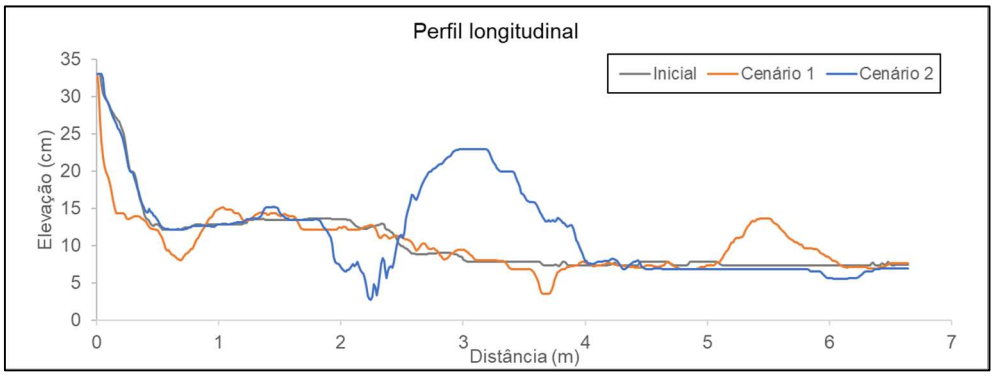


Figura 3.5 – Comparação dos perfis longitudinais traçados no talvegue para a condição inicial (cinza), condição final do Cenário 1 (laranja) e condição final do Cenário 2 (azul).

Os MDTs gerados foram capazes de reproduzir as principais variações de fundo observadas nos ensaios. No Cenário 1, caracterizado por maiores magnitudes de velocidade do escoamento (Figura 3.6a), verificou-se um processo erosivo mais intenso no trecho do rio a montante da bacia de dissipação (Figura 3.6b). Nessa região, a erosão ocorreu predominantemente nas margens, com recuo da ordem de 6 cm, e no leito, com rebaixamento aproximado de 4 cm, conforme evidenciado na Seção 1. Parte do material erodido foi redepositada imediatamente a jusante, na forma de uma barra de fundo localizada próxima à posição de 1 m ao longo do perfil longitudinal, com altura aproximada de 3 cm. No entanto, a maior parcela do sedimento transportado foi depositada mais a jusante (Figura 3.6d), na região correspondente à posição de 5 m ao longo do talvegue, formando uma barra de fundo com altura da ordem de 8 cm. Adicionalmente, foram identificados processos erosivos de menor magnitude nas margens a jusante da bacia de dissipação (Figura 3.6c), com valores próximos de 2 cm, conforme observado na Seção 2.

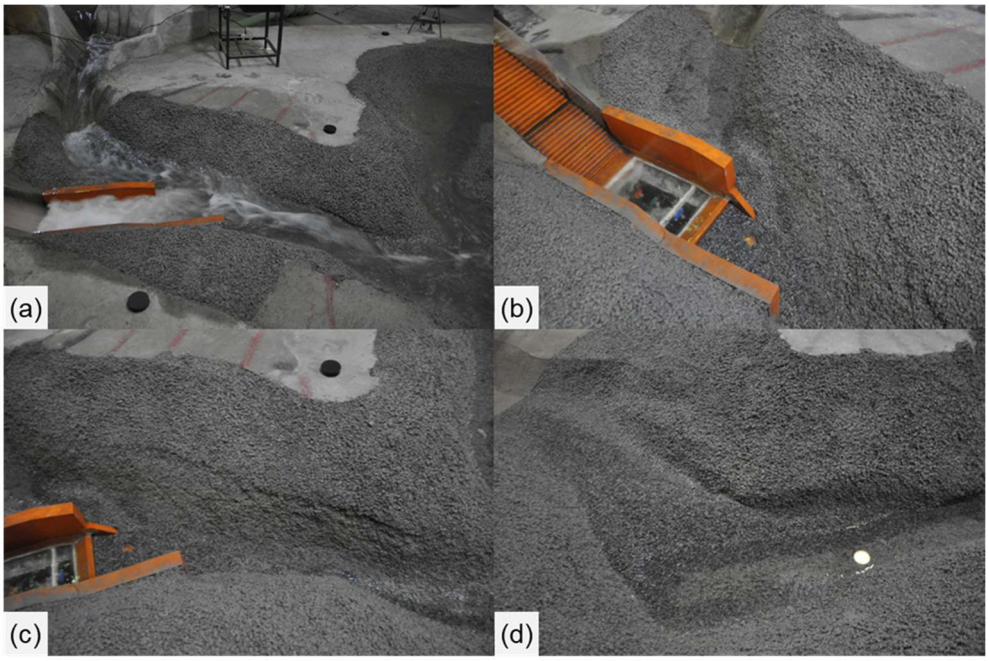


Figura 3.6 – (a) Durante o ensaio do Cenário 1. (b) Fim do ensaio, vista de jusante para montante do trecho a montante da bacia de dissipação. (c) Fim do ensaio, vista da margem esquerda a jusante da bacia de dissipação. (d) Fim do ensaio, vista do trecho mais a jusante da caixa de fundo móvel.

No Cenário 2, não houve variação significativa de fundo a montante da bacia de dissipação (Seção 1). As movimentações de fundo concentraram-se a jusante da bacia de dissipação, sendo fortemente influenciadas pela atuação do jato d'água incidente sobre a margem esquerda do canal (Figura 3.7a). Esse escoamento promoveu um recuo da margem da ordem de 8 cm e um aprofundamento do leito de aproximadamente 12 cm, conforme indicado na Seção 2. Destaca-se, entretanto, que o MDT gerado não foi capaz de representar integralmente a cavidade erosiva formada nessa região (Figura 3.7b). Isso ocorre porque o método baseado na identificação da interseção entre a superfície livre e o fundo permite capturar apenas a geometria visível a partir da superfície, não sendo capaz de representar porções com geometria reentrante ou protegidas por sobreposição lateral, como é o caso de cavidades erosivas em margens íngremes. O material erodido depositou-se predominantemente logo a jusante desse trecho (Figura 3.7c), entre as posições 2,5 m e 4 m ao longo do perfil longitudinal, formando uma barra de fundo com altura máxima da ordem de 15 cm. No trecho mais a jusante do modelo, não foram identificadas alterações significativas do leito, conforme mostra a Figura 3.7d.

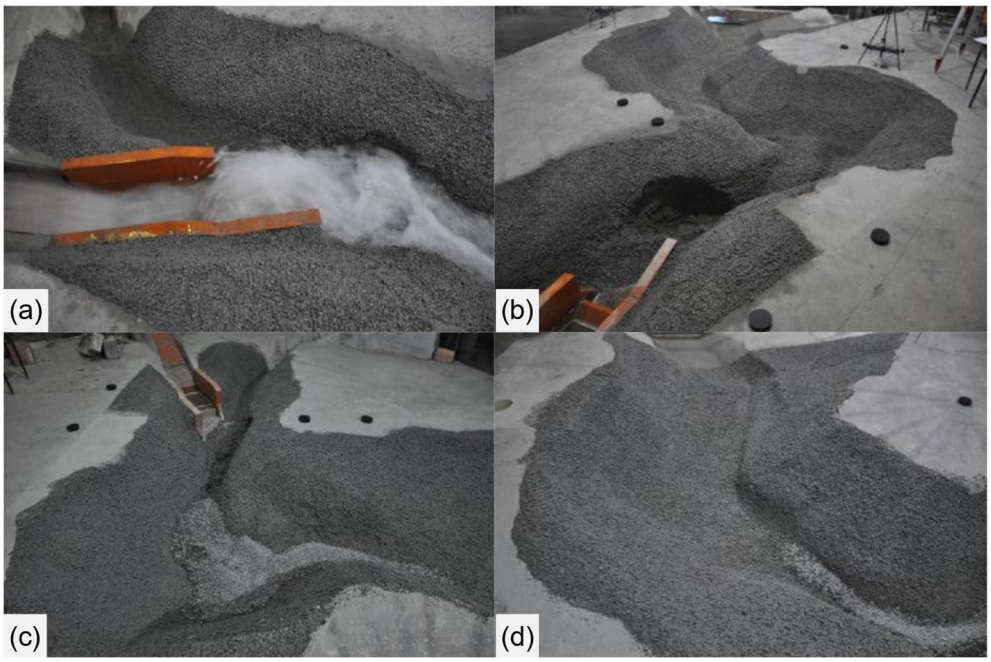


Figura 3.7 – (a) Durante o ensaio do Cenário 2. (b) Fim do ensaio, vista de montante para jusante do trecho a jusante da bacia de dissipação. (c) Fim do ensaio, vista de jusante para montante do trecho na qual o sedimento ficou depositado. (d) Fim do ensaio, vista de montante para jusante do trecho final do fundo móvel.

4. DISCUSSÃO

4.1 Sobre a qualidade do levantamento e as limitações observadas

O levantamento batimétrico realizado foi capaz, de forma geral, de reproduzir de forma consistente as principais variações de fundo observadas nos ensaios, capturando adequadamente as feições de maior escala, incluindo regiões de erosão nas margens e no leito, bem como as zonas de deposição desse material. Essa capacidade é evidenciada pela boa concordância entre os MDT gerados e os perfis transversais e longitudinal analisados, especialmente no que se refere à identificação das principais áreas de mobilização de sedimentos em ambos os cenários avaliados.

Adicionalmente, o tempo necessário para aquisição dos dados mostrou-se relativamente curto, da ordem de até 90 minutos, representando uma otimização de tempo em comparação a métodos tradicionais de levantamento desse tipo e ainda com a vantagem de um detalhamento muito maior do fundo.

No entanto, limitações foram observadas na representação de feições de menor escala e em geometrias mais complexas. Em particular, no Cenário 2, o método não foi capaz de representar, como um todo, a cavidade erosiva desenvolvida na margem esquerda a jusante da bacia de dissipação, caracterizada por uma geometria reentrante. Essa limitação está associada ao princípio físico do método, baseado na identificação da interseção entre a superfície livre e o fundo, o que restringe a reconstrução às porções visíveis do leito, não sendo possível capturar regiões com sobreposição lateral ou inclinação negativa. Estratégias alternativas, como a utilização de múltiplos pontos de vista (por exemplo, com a incorporação de uma segunda câmera posicionada lateralmente) poderiam ampliar a capacidade de captura dessas feições. Cabe destacar que métodos tradicionais de levantamento de fundo também apresentam limitações na representação dessas feições, em função da dificuldade de posicionamento de elementos físicos (como barbantes) em geometrias reentrantes ou com elevada inclinação, sem provocar alterações na própria configuração do fundo.

Adicionalmente, pequenas variações locais nas margens podem não ser completamente resolvidas em função das limitações inerentes à resolução espacial e ao procedimento de aquisição adotado. Nesse caso, melhorias na resolução do sistema de imagem e a redução do espaçamento vertical entre aquisições constituem caminhos potenciais para o refinamento da representação topográfica.

Além disso, observou-se que o desempenho do método é sensível às condições de iluminação durante a aquisição das imagens. Em regiões com maior irregularidade do fundo, a presença de micro-relevos acentuados favorece a formação de sombras, reduzindo o contraste entre a superfície livre e o leito do modelo. Essa condição dificulta a identificação automática da interface por meio de técnicas de processamento digital. Nessas situações, foi necessária, em alguns casos, a identificação manual da linha de contato água-fundo, evidenciando uma limitação operacional do método quando aplicado em condições de iluminação não uniformes. Esse aspecto ressalta a importância de um planejamento adequado do sistema de iluminação, de modo a minimizar efeitos de sombreamento e garantir maior qualidade na extração das curvas de nível.

4.2 Sobre as incertezas

Também cabe destacar que o método apresentado envolve incertezas inerentes tanto ao sistema de aquisição quanto ao procedimento de reconstrução da superfície. Entre essas, destacam-se a determinação do nível d'água, a identificação da interface água-fundo, o processo de georreferenciamento e, adicionalmente, a resolução vertical definida pela estratégia de aquisição das imagens.

A cota vertical atribuída a cada curva de nível é definida diretamente a partir da leitura dos sensores de nível d'água no instante de aquisição da imagem. Dessa forma, a incerteza associada à posição vertical de cada curva está relacionada principalmente à precisão dos sensores e à variabilidade observada entre suas leituras. A diferença

entre os sensores fornece uma estimativa empírica da variabilidade espacial da superfície livre durante o esvaziamento, bem como dos efeitos instrumentais associados à medição. No presente estudo, essa diferença apresentou valor médio de até de 2,6 mm e desvio padrão de até 1,8 mm, sendo este último adotado como medida representativa da incerteza associada à determinação do nível d'água. É possível reduzir esta incerteza, aumentando-se o tempo de esvaziamento do modelo físico, ou seja, esvaziando-o mais lentamente. Entretanto, isso pode levar a tempos de mapeamento mais longos, sendo, portanto, necessário avaliar o nível de precisão requerido para os resultados.

A identificação da interface água-fundo a partir das imagens depende da qualidade das imagens, das condições de iluminação e dos parâmetros adotados no processamento digital. Considerando uma incerteza típica de detecção da ordem de ±1 pixel e a escala espacial das imagens utilizadas, essa contribuição pode ser estimada em aproximadamente ±4,5 mm (valor obtido após o ajuste das imagens no plano XY). Esse valor reflete a resolução espacial do sistema de aquisição e constitui uma das principais fontes de incerteza horizontal do método. Esta incerteza pode ser reduzida utilizando-se um sistema de várias câmeras zenitais mais próximas da área a ser mapeada, e que tenham superposição de imagens. Mais uma vez é necessário avaliar a precisão necessária para os resultados, pois a utilização de mais de uma câmera, torna o pós-processamento das imagens mais demorado.

No que se refere ao georreferenciamento, a qualidade do ajuste foi avaliada a partir da incerteza associada à seleção dos pixels utilizados na definição dos GCPs. Considerando a resolução espacial do sistema de aquisição, essa incerteza foi estimada como ±2,25 mm, valor adotado como representativo da incerteza associada à transformação entre o plano da imagem e o sistema de coordenadas do modelo físico.

Adicionalmente, deve-se ressaltar que o passo vertical definido para a variação do nível d'água (adotado neste trabalho como 1,25 cm) exerce influência sobre o detalhamento da representação topográfica de fundo. Entretanto, este parâmetro não representa uma incerteza do método. Em princípio, a adoção de intervalos menores permite o refinamento da representação topográfica, ao custo de maior tempo de processamento.

Por fim, os resultados indicam que as diferentes fontes de incerteza se mantêm na ordem de até 5 milímetros, sendo compatíveis com a escala do modelo físico e com os objetivos do estudo. Valores dessa magnitude são consistentes com aqueles reportados na literatura para métodos baseados em aquisição de imagens e reconstrução tridimensional de superfícies, os quais demonstram que, quando adequadamente aplicados, tais métodos são capazes de fornecer representações confiáveis da topografia em estudos experimentais [12, 13, 17, 18].

Nesse contexto, a combinação das técnicas adotadas mostrou-se adequada para a obtenção de MDTs com resolução e consistência suficientes para a análise qualitativa e quantitativa dos padrões erosivos observados no modelo físico, permitindo a identificação das principais feições morfológicas.

5. CONCLUSÃO

A abordagem apresentada neste estudo oferece diversas vantagens, sobretudo em relação ao custo dos equipamentos envolvidos, que são acessíveis e amplamente disponíveis em laboratórios de modelagem física. Além disso, o método mostrou-se simples de aplicar, com baixo custo computacional e rápida obtenção dos resultados. Os Modelos Digitais de Terreno gerados apresentaram boa compatibilidade com as configurações de fundo observadas nos ensaios, permitindo a identificação tanto de variações suaves, como no Cenário 1, quanto de modificações mais expressivas, como no Cenário 2.

Apesar dos resultados satisfatórios, foram identificadas algumas limitações inerentes ao método, especialmente na representação de geometrias complexas e na dependência das condições de aquisição das imagens, como iluminação e resolução espacial. Ainda assim, tais limitações não comprometem a aplicabilidade do método para a análise de padrões morfológicos em modelos físicos e podem ser mitigadas por meio de ajustes no arranjo experimental, como o uso de múltiplos pontos de vista, melhorias no sistema de iluminação e refinamento da resolução de aquisição.

Por fim, destaca-se que o método proposto ainda não foi comparado diretamente com técnicas baseadas em equipamentos mais sofisticados, como varredura a laser ou fotogrametria avançada. Dessa forma, a realização de estudos comparativos representa uma etapa futura relevante para a validação mais abrangente da metodologia. Ainda assim, os resultados obtidos indicam que a abordagem apresentada constitui uma alternativa promissora, de baixo custo e fácil implementação para o levantamento de fundo em ensaios de modelos físicos hidráulicos, especialmente em contextos em que recursos instrumentais são limitados.

6. AGRADECIMENTOS

À Samarco Mineração S.A. pelo financiamento da pesquisa e pela disponibilização de dados e informações necessárias para elaboração deste artigo, ao Centro Tecnológico de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (CTH-USP) pela disponibilização da infraestrutura necessária para desenvolvimento da pesquisa, à Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – FCTH pelo apoio técnico e financeiro na elaboração do artigo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MARTINEZ, C. B. et al. (2023) – “Proposal to use new methods of design and construction in mobile riverbed physical models: the Salto do Paraopeba dam case”, RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Brasil.

[2] NOVAK, P.; GUINOT, V.; JEFFREY, A.; REEVE, D. E. (2010) – “Hydraulic modelling: an introduction – principles, methods and applications”, Spon Press, London, Reino Unido.

[3] LYONS, Troy C. (2019) – Deep dive: using physical models to design hydraulic structures for deep tunnels. In: IAHR WORLD CONGRESS, 38., 2019, Panama City, Panama. E-proceedings [...] Panama City: IAHR, DOI: 10.3850/38WC092019-1218.

[4] YALIN, M. S. (1971) – “Theory of hydraulic models”, Macmillan Press, New York, USA.

[5] ETTEMA, R.; ARDT, R.; ROBERTS, P.; WAHL, T. (2000) – “Hydraulic modelling: concepts and practice”, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No. 97, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.

[6] KARMACHARYA, S. K.; RUTHER, N.; SHRESTHA, U.; BISHWAKARMA, M. B. (2021) – “Evaluating the Structure from Motion Technique for Measurement of Bed Morphology in Physical Model Studies”, *Water*, v. 13, n. 7, 998, DOI: 10.3390/w13070998, MDPI, Basel, Suíça.

[7] LANE, S. N.; CHANDLER, J. H.; PORFIRI, K. (2001) – “Monitoring River Channel and Flume Surfaces with Digital Photogrammetry”, Journal of Hydraulic Engineering, v. 127, USA.

[8] DE RUIJSSCHER, T. V.; HOITINK, A. J. F.; DINNISSEN, S.; VERMEULEN, B.; HAZENBERG, P. (2018) – “Application of a line laser scanner for bed form tracking in a laboratory flume”, Water Resources Research, USA.

[9] KIRAGA, M.; MARKIEWICZ, M. (2018) – “Applying Laser Scanning Technology to Studying Alluvial Flume-Bed Topography in Laboratory Conditions”, anais do International Conference on Fluvial Hydraulics – River Flow 2018, Lyon, França.

[10] LI, X. et al. (2021) – “LIDAR scanning as an advanced technology in physical hydraulic modeling”, Remote Sensing, v. 13, Suíça.

[11] REMONDINO, F.; EL-HAKIM, S. (2006) – “Image-Based 3D Modelling: A Review”, The Photogrammetric Record, Reino Unido.

[12] WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. (2012) – “Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications”, Geomorphology, v. 179, Reino Unido.

[13] MICHELETTI, N.; CHANDLER, J.; LANE, S. N. (2015) – “Structure from Motion (SfM) Photogrammetry”, anais/relatório em Geomorphological Techniques, British Society for Geomorphology, Londres, Reino Unido.

[14] CHANDLER, J.; BUCKLEY, S. (2016) – “Structure from Motion (SfM) Photogrammetry vs Terrestrial Laser Scanning”, anais em Geoscience Handbook 2016, American Geosciences Institute, Alexandria, USA.

[15] SMITH, M. W.; CARRIVICK, J. L.; QUINCEY, D. J. (2016) – “Structure from Motion Photogrammetry in Physical Geography”, Progress in Physical Geography, Reino Unido.

[16] ABERLE, J.; RENNIE, C. D.; ADMIRAAL, D. M.; MUSTE, M. (2017) – “Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management – Volume II: Instrumentation and Measurement Techniques”, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

[17] LEDUC, P.; PEIRCE, S.; ASHMORE, P. (2019) – “Challenges and applications of structure-from-motion photogrammetry in a physical model of a braided river”, Earth Surface Dynamics, Alemanha.

[18] JAMES, M. R.; ROBSON, S. (2012) – “Straightforward Reconstruction of 3D Surfaces and Topography with a Camera: Accuracy and Geoscience Application”, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, Estados Unidos.

[19] BEZERRA, R. O.; BERNARDINO, J. C. M.; LATEYRON, T. (2024) – “Impact of climate change on breakwater armor design: Advancements on reduced-scale physical modeling methodologies”, anais do International Coastal Symposium (ICS 2024), Doha, Catar.

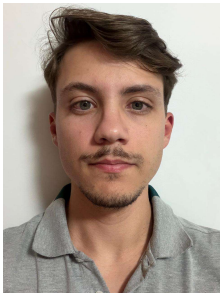
[20] PETERKA, A. J. (1984) – Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. United States Department of the Interiror. Bureau of Reclamation. 240p. USA.

[21] SUTHERLAND, J.; SOULSBY, R. (2010) – “Guidelines for physical modelling of mobile sediments”, HR Wallingford Report HRPP463, Reino Unido.

[22] MALTAURO, R.; STONE, M.; COLLINS, A. L.; KRISHNAPPAN, B. G. (2024) – “Advancing mechanistic understanding of cohesive sediment transport: integrating flume experiments, field measurements, and modelling approaches in a gravel-bed river”, Science of the Total Environment, v. 956, Elsevier, Países Baixos.

[23] GOMIT, G.; JARNY, S.; LECOSTEY, P.; PHAM VAN BANG, D.; THOMAS, L. (2025) – “Using cohesive model materials in mud erosion experiments”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Estados Unidos.

[24] VAN RIJN, L. C. (1993) – “Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas”, Aqua Publications, Amsterdam, Holanda.

	**Lucas FONTANETTI MARTINS** Graduado em Engenharia Civil pelo Instituto Presbiteriano Mackenzie (2020). Doutorando em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Engenheiro na Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica há 5 anos, com atuação no desenvolvimento de estudos de modelagem hidráulica, incluindo modelagem física e numérica.
	**Roberto de OLIVEIRA BEZERRA** Graduado em Engenharia Mecatrônica pela USP (2013) e mestre em Engenharia Civil, com ênfase em Engenharia Hidráulica, pela Escola Politécnica da USP (2021). Doutorando em medição por imagens aplicada à hidráulica. Engenheiro da FCTH há mais de 10 anos, coordena o Laboratório de Instrumentação, atuando no desenvolvimento, manutenção e montagem de sensores e atuadores.
	**Alexandre Ângelo Carmo LUIZ DA SILVA** Graduado em Engenharia Ambiental (2014) e Mestre em Recursos Hídricos pela UFMG (2021). Atua há mais de 10 anos em projetos de engenharia voltados a barragens de usos múltiplos e sistemas de disposição de rejeitos. Possui publicações técnicas em modelagem hidráulica computacional, com ênfase em estudos de ruptura hipotética de barragens. Atualmente integra a Gerência de Projetos Estruturantes da Samarco.
	**José Rodolfo SCARATI MARTINS** Engenheiro Civil, MSc, PhD, Professor Titular do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da USP, pesquisador na área de modelagem aplicada ao monitoramento ambiental, hidrodinâmica, transporte de poluentes e drenagem sustentável.
	**José Carlos de Melo BERNARDINO** Graduado em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP (2000), com Mestrado (2005) e Doutorado (2015) em Engenharia Civil com ênfase em Obras Hidráulicas pela EPUSP. Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da EPUSP desde 2013. Engenheiro e Coordenador de projetos da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – FCTH desde 2001, com especialização em modelagem física e computacional de escoamentos em obras hidráulicas como barragens, portos e hidrovias, e em regiões fluviais, estuarinas, costeiras e marítimas.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.1
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

Revisão bibliográfica sobre a influência do grau de saturação na liquefação de solos arenosos não saturados por meio de ensaios triaxiais cíclicos

Mariana MELO
Engenheira Geotécnica - INTERTECHNE

Samantha BASÍLIO
Engenheira Geotécnica - INTERTECHNE

Vitória BORGES
Engenheira Geotécnica - INTERTECHNE

RESUMO

A liquefação é um fenômeno caracterizado pela redução significativa da resistência ao cisalhamento de solos granulares, levando-os a um comportamento semelhante ao de um fluido. Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre a influência do grau de saturação no processo de liquefação em solos arenosos não saturados. Foram analisados estudos que investigaram o comportamento mecânico desses materiais em condições saturadas e não saturadas, considerando graus de saturação variando entre 100% a 62%, este último representativo da condição natural. A literatura aponta que, embora a liquefação seja mais recorrente em solos totalmente saturados, solos não saturados também podem apresentar suscetibilidade ao fenômeno, porém com desenvolvimento mais tardio. Observa-se que fatores como variações de tensões, carregamentos cíclicos e características do material exercem influência direta na ocorrência da liquefação. A compreensão desses aspectos contribui para avaliações mais consistentes do comportamento geotécnico e para a gestão de riscos em projetos de engenharia.

ABSTRACT

Liquefaction is a phenomenon characterized by a significant reduction in the shear strength of granular soils, causing them to behave similarly to a fluid. This article presents a literature review on the influence of the degree of saturation on the liquefaction process in unsaturated sandy soils. Studies investigating the mechanical behavior of these materials under saturated and unsaturated conditions were analyzed, considering degrees of saturation ranging from 100% to 62%, the latter being representative of natural conditions. The literature indicates that, although liquefaction occurs more frequently in fully saturated soils, unsaturated soils may also be susceptible to the phenomenon, although with a delayed development. It is observed that factors such as stress variations, cyclic loading, and material characteristics directly influence the occurrence of liquefaction. Understanding these aspects contributes to more consistent evaluations of geotechnical behavior and to risk management in engineering projects.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a engenharia geotécnica no Brasil tem ganhado maior reconhecimento, principalmente devido aos desastres ambientais relacionados à ruptura de barragens de rejeitos, como os ocorridos em Mariana/MG (Barragem do Fundão, 2015) e Brumadinho/MG (2019). Esses eventos foram amplamente associados ao fenômeno da liquefação do solo, no qual o solo perde significativamente sua resistência ou rigidez em um curto período, tornando-se incapaz de sustentar cargas (JEFFERIES e BEEN, 2016) [1].

A liquefação pode ocorrer em solos saturados ou parcialmente saturados, podendo estar apresentadas em materiais granulares, como areias e siltes com elevados índices de vazios, bem como em argilas sensíveis. Destaca-se que a ocorrência desse fenômeno está condicionada a fatores específicos, dentre os quais se sobressaem o comportamento contrátil do material e a presença de amolecimento por deformação (*strain softening*) (ROBERTSON, 2021) [2].

Este artigo de revisão tem como objetivo apresentar um panorama abrangente sobre a influência do grau de saturação na liquefação de solos não saturados arenosos. Para isso, são revisados estudos acadêmicos e pesquisas recentes que abordam o tema, com base em cinco artigos científicos selecionados. O intuito deste estudo é compilar, avaliar criticamente e sintetizar o conhecimento existente sobre o processo de liquefação em areias.

Estudos recentes indicam que areias apresentam comportamento semelhante aos rejeitos da mineração. Robertson (2021) [2]., apresenta a relação do comportamento não drenado e drenado para as areias, utilizando como base os materiais advindos dos rejeitos das estruturas de Fundão e Feijão. Tal dado apresenta a justificativa da escolha do material arenosos como material de análise nos experimentos revisados.

Por fim, este artigo está organizado da seguinte forma:

1. Análise dos dados coletados a partir da literatura científica;
2. Discussão dos resultados, com base nas informações revisadas; e
3. Conclusões e observações finais, sintetizando as descobertas e indicando possíveis direções para estudos futuros.

2. METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa, desenvolvida com o objetivo de analisar estudos relacionados à influência do grau de saturação no processo de liquefação de solos arenosos não saturados.

A metodologia adotada baseou-se na análise de artigos científicos que abordam o tema objeto desta pesquisa, selecionados em bases de dados acadêmicas. Foram priorizados estudos que analisam de forma conjunta os parâmetros como grau de saturação (S_r), densidade relativa (D_r) e pressão de confinamento efetiva (p'_0) considerando sua influência no potencial de liquefação dos materiais.

Como critério de seleção, foram utilizados trabalhos que empregaram ensaios triaxiais cíclicos na avaliação do comportamento dos solos, visando identificar a suscetibilidade dos materiais ao processo de liquefação.

Os estudos selecionados foram analisados de forma descritiva e comparativa, considerando principalmente as metodologias empregadas, os parâmetros adotados e os resultados obtidos pelos autores quanto à influência das condições de saturação no desenvolvimento da liquefação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Caracterização Material

Para avaliar a influência do grau de saturação no processo de liquefação de solos não saturados, torna-se necessário definir inicialmente o tipo de material a ser analisado. Nesse contexto, a areia foi adotada como material de referência, por apresentar composição natural e comportamento geotécnico semelhante ao observado em rejeitos depositados em barragens.

Jefferies e Been (2016) [1] destacaram a relevância dos ensaios cíclicos em materiais siltosos e siltes arenosos, comuns em rejeitos de minas. O ensaio cíclico (triaxial dinâmico) envolve a aplicação de cargas repetidas, gerando um gráfico que relaciona o número de ciclos à deformação acumulada.

Vernay et al. (2018) [3]. conduziu ensaios cíclicos em três amostras com diferentes graus de saturação (1, 0,98 e 0,95), constatando que amostras com maior grau de saturação (S_r) se liquefizeram em um menor número de ciclos. Em estudo posterior, Vernay et al. (2016) [4] obteve resultados semelhantes ao avaliar cinco ensaios cíclicos variando grau de saturação e sucção. O estudo indicou que tanto amostras saturadas quanto parcialmente saturadas sofreram liquefação, com um atraso na liquefação para aquelas com menor grau de saturação.

Shamas et al. (2024) [5] realizou ensaios triaxiais dinâmicos não drenados com controle de deformação para investigar o potencial de liquefação da Areia Hostun RF sob condições não saturadas. O material foi submetido a três diferentes graus de saturações (0,96, 0,85 e 0,62). Os estudos demonstram que, enquanto as amostras com alta saturação (0,96 e 0,85) atingiram o estado de liquefação, a amostra com Sr de 0,62, permaneceu estável, sem apresentar indícios de liquefação mesmo após 50 ciclos de carregamento.

Zhang et al. (2016) [6] realizaram um estudo de modelagem numérica com o objetivo de investigar o potencial de liquefação de areias não saturadas, utilizando as areias de Nevada e Toyoura sob carregamentos cíclicos. A análise paramétrica foi conduzida considerando cinco graus de saturação (Sr) (0,98, 0,95, 0,90, 0,85 e 0,75) de densidades relativas (Dr) de 30%, 50% e 70%. Os resultados obtidos indicaram que a resistência à liquefação aumenta com a redução do grau de saturação, bem como com o incremento da densidade relativa e da pressão de confinamento efetiva. Entretanto, observa-se que os ensaios submetidos ao carregamento triaxial cíclico não foram realizados utilizando o mesmo tipo de material para todas as condições analisadas, visto que a areia de Toyoura foi empregada nos ensaios com Sr=0,95, enquanto a areia de Nevada foi utilizada para condições de Sr=0,90, ambas submetidas a parâmetros de confinamento distintos.

Unno et al. (2008) [7] investigou nove amostras, variando o grau de saturação inicial e os índices de vazios, demonstrando uma relação direta entre liquefação e saturação. Foi observado que, em materiais com grau de saturação mais baixo, a tensão efetiva do corpo de prova (CP) chegou a registrar tensões a zero, levando à liquefação.

3.2 Solo Não Saturado e a Liquefação

A liquefação dos solos é um fenômeno amplamente estudado devido às suas implicações na engenharia geotécnica. Nos últimos anos, pesquisas têm se concentrado na liquefação de solos não saturados, buscando compreender os mecanismos envolvidos nesse processo. Estudos laboratoriais indicam que a suscetibilidade à liquefação está diretamente relacionada ao grau de saturação do solo, sendo que maiores índices de saturação tendem a intensificar esse comportamento. Esses achados reforçam a importância de considerar a saturação como um parâmetro crítico na avaliação da estabilidade dos solos sujeitos a carregamentos dinâmicos.

Vernay et al. (2018) [4] investigou a influência do grau de saturação no comportamento dos solos frente à problemática da liquefação, utilizando areia fina e limpa, mais conhecida como Fontainebleau. O estudo foi desenvolvido em laboratório e consistiu na moldagem das amostras, reconstituídas por meio da técnica de compactação úmida. O processo de saturação das amostras envolveu a circulação de CO_2 por 30 minutos, seguida da circulação de água. Para a determinação da saturação, utilizou-se o coeficiente de Skempton B, associado ao grau de saturação (S_r). Os ensaios foram realizados por meio do triaxial cíclico, no qual foram testadas cinco amostras com diferentes níveis de S_r.

O grau de saturação foi obtido por meio do coeficiente de Skempton (parâmetro B). Para a realização do ensaio cíclico, foram definidos três níveis distintos de grau de saturação (Sr) com base em parâmetros experimentais, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados para ensaios. (Fonte: Adaptado de Varnay et al. (2018))

Identificação	Grau de Saturação (S_r)
Unsat	0,90
Parcialmente_Sat_1	0,95
Parcialmente_Sat_1	0,98
Total_Sat_1	1,00
Total_Sat_2	1,00

Após a conclusão dos ensaios, foi possível determinar o seguinte comportamento para os três estados de saturação:

- Para a zona totalmente saturada ($S_r = 1$), a liquefação ocorreu após 11 ciclos;
- Para a zona parcialmente saturada ($S_r = 0,98$ e $S_r = 0,95$), a liquefação ocorreu em diferentes ciclos, observando-se que a amostra com menor grau de saturação resistiu a um maior número de ciclos até a ocorrência da liquefação, em comparação com a amostra de maior S_r;
- Para a zona não saturada, não foi observada liquefação, mas constatou-se instabilidade no ensaio após 6000 ciclos.

Os resultados reforçam a influência do grau de saturação na suscetibilidade à liquefação, destacando a importância desse parâmetro na previsão do comportamento dos solos sob carregamentos dinâmicos.

Shamas et al. (2024) [5] analisou o potencial de liquefação em areias. Nesse estudo, utilizou-se areia de Hostun, um material de referência para estudos de liquefação conduzidos na França. O ensaio triaxial foi empregado para replicar as condições do solo encontrado no subsolo. O processo inicial do ensaio baseou-se na calibração das amostras, utilizando pressão de confinamento aplicada por meio de água e um controlador automático de pressão pneumática (PAPC). Paralelamente, um controlador automático de pressão hidráulica (HAPC) foi utilizado para controlar o grau de saturação.

Para a preparação das amostras, adotou-se o método da compactação úmida, com corpos de prova de 70 mm de diâmetro e 140 mm de altura. O teor de umidade foi fixado em 8% durante a preparação, e a densidade do material foi definida individualmente para cada amostra.

O ensaio foi conduzido de acordo com as premissas do triaxial cíclico, estabelecendo-se uma tensão inicial para a deformação axial. Para avaliação das deformações, definiu-se uma sequência de amplitudes, iniciando em 2% e progredindo para 3%, 4% e 5%. O estudo foi conduzido até que a amostra atingisse a liquefação ou um estado estável. Foram realizados três testes distintos, nos quais a densidade relativa (D_r) variou entre 55% e 71%, e o grau de saturação (S_r), entre 62% e 96%. Destaca-se que, em um dos testes, com densidade relativa de 56% e grau de saturação inicial de 62%, não foi observado processo de liquefação, mesmo após a amostra ter sido submetida a 50 ciclos de carga.

Os resultados do estudo indicaram que a liquefação pode ocorrer mesmo em solos não saturados, dependendo de certos parâmetros. Ressalta-se que o grau de saturação desempenha um papel fundamental para a ocorrência desse processo.

A Além desses estudos, Zhang et al. (2016) [6] também desenvolveu pesquisas sobre o mesmo tema, obtendo resultados semelhantes aos previamente detalhados. O projeto teve como objetivo investigar o fenômeno da liquefação em areias não saturadas. Os principais conceitos abordados no estudo estavam relacionados ao grau de saturação e sua influência no processo de liquefação. Observou-se, nos ensaios, que a resistência do material à liquefação estava diretamente associada a esses fatores iniciais e a eventos como terremotos.

As premissas iniciais para a realização do ensaio foram estabelecidas considerando qual modelo previsto, de modo a avaliar o comportamento das areias não saturadas sob diferentes condições. Posteriormente, o modelo foi calibrado com base em dados experimentais de areias Toyoura e Nevada. Essa calibração foi conduzida por meio da definição de parâmetros do solo, incluindo densidade relativa e tensão de confinamento efetiva. O estudo foi realizado utilizando ensaios triaxiais cíclicos, método amplamente empregado para a análise de liquefação em solos.

Ao final do estudo, foram obtidas as seguintes conclusões com relação aos parâmetros do material:

- Saturação: A resistência à liquefação aumenta à medida que o grau de saturação diminui.
- Densidade: Quanto maior a densidade do material, maior sua resistência à liquefação.
- Pressão de confinamento: A resistência do solo diminui conforme a pressão de confinamento aumenta.

As conclusões dos ensaios foram apresentadas e representadas graficamente no projeto, considerando os parâmetros de grau de saturação, densidade e tensão de confinamento. Os resultados indicaram que o processo de liquefação pode ocorrer em areias não saturadas, sendo fundamental levar em conta todos os parâmetros físicos e mecânicos das amostras.

O processo de liquefação em solos não saturados, considerando a influência do grau de saturação e dos fatores climáticos, havia sido estudado por Vernay et al. (2016). [6]. O estudo teve início com a calibração dos parâmetros e dados necessários para a realização dos ensaios triaxiais cíclicos. Como material de estudo, utilizou-se areia fina. Para a definição da curva característica do solo, foram empregados ensaios de papel filtro. Os principais parâmetros do estudo foram os seguintes:

- Reconstituição: Compactação Úmida a 3%;
- Densidade: >0,85;
- Circulação de CO2: Processo definido em 30 minutos;
- Contra-pressão da amostra: 100 kPa.

O grau de saturação foi determinado a partir do coeficiente de Skempton (parâmetro B). Para a realização do ensaio cíclico, foram definidos três valores distintos de grau de saturação (Sr), com base em parâmetros experimentais, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados para ensaios. (Fonte: Adaptado de Varnay et al. (2016))

Identificação	Grau de Saturação (S_r)
Unsat	0,95
Parcialmente_Sat_1	0,98
Total_Sat_2	1,00

Os dados apresentados na tabela para solos saturados e parcialmente saturados foram definidos com base no parâmetro B (Skempton, 1954). Para os solos não saturados (unsat), a abordagem inicial teve como objetivo verificar amostras considerando o controle da sucção inicial. Esses valores foram obtidos por meio de ensaios utilizando uma pedra porosa de alta entrada de ar.

Conforme ilustrado na figura 1, a geração de pressão neutra desenvolve de forma mais lenta nas amostras parcialmente saturadas, resultando no aumento de número de ciclos até o processo de liquefação. Esses resultados detalham que porções variáveis de redução do grau de saturação (Sr) alteram expressivamente a reposta ao processo de liquefação do material.

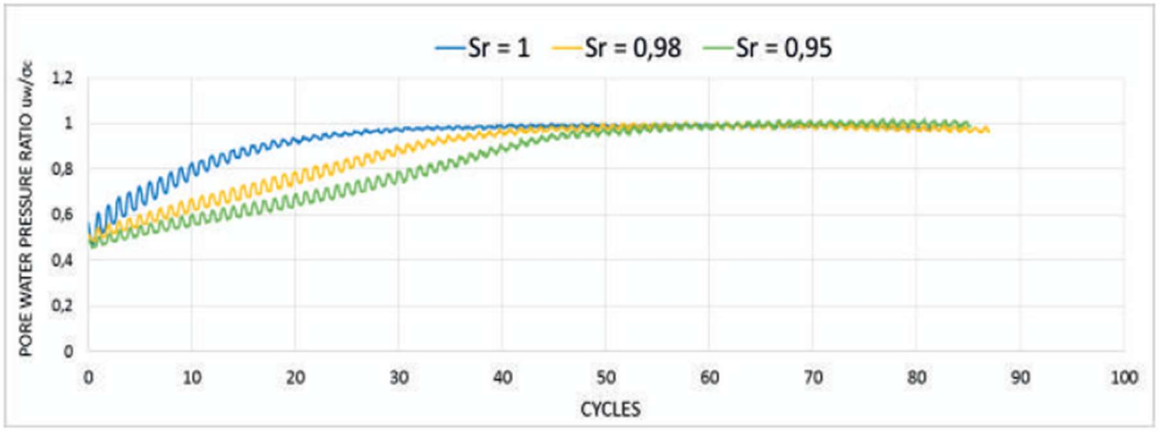


Figura 1 – Gráfico – Evolução da razão da pressão neutra vs número de ciclos em diferentes graus de saturação. (Fonte: Adaptado de Vernay et al. (2016))

Assim como é relacionado o grau de saturação no material (Sr), a deformação é um ponto apresentado pelo autor. A figura 2, apresenta a influência que a redução do grau de saturação (Sr), retarda o desenvolvimento das deformações axiais.

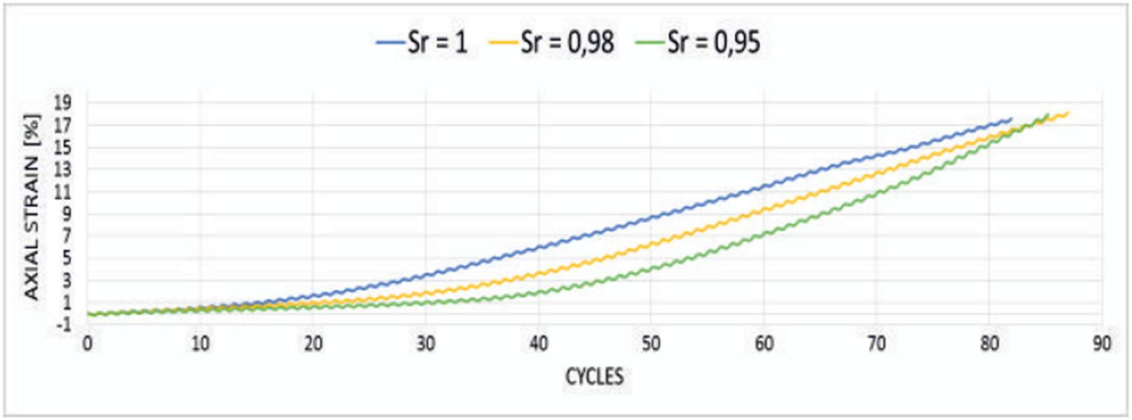


Figura 2 – Gráfico – Evolução deformação axial vs número de ciclos em diferentes graus de saturação. (Fonte: Adaptado de Vernay et al. (2016))

O estudo apresentou as seguintes conclusões, com base nos ensaios triaxiais cíclicos:

1. Observou-se que o grau de saturação (S_r) tem relação direta com o processo de liquefação. Concluiu-se que quanto menor o S_r, maior será a resistência do solo à liquefação;
2. A presença de ar nos poros do solo aumenta a rigidez inicial, evidenciando a influência da sucção nesse processo;
3. O material classificado como não saturado no ensaio apresentou maior resistência à liquefação em comparação aos demais; entretanto, o processo de liquefação pode ocorrer de forma mais tardia; e
4. A curva característica do solo destacou a importância da sucção e sua relação com o comportamento do material em função do grau de saturação.

Além desses pesquisadores, Unno et al. (2008) [7] já havia definido algumas premissas e parâmetros em sua pesquisa sobre a liquefação em solos não saturados. O estudo foi desenvolvido com o objetivo de compreender o processo de liquefação causado por terremotos em aterros, como o ocorrido em Datashita-Tsukidate.

Inicialmente, previu-se que o material analisado possuía as mesmas características daquele que sofreu liquefação. Dessa forma, as premissas adotadas para a elaboração do estudo seguiram a seguinte abordagem:

Foram realizados ensaios triaxiais cíclicos para avaliar o comportamento do solo, observando-se que a tensão efetiva apresentou redução, mesmo em amostras com baixo grau de saturação:

- Para a execução dos ensaios, foi realizado o controle da sucção (pressão da água e do ar nos poros), além da compressão volumétrica; e
- Os parâmetros foram determinados por meio de diferentes testes para obter os valores de sucção e saturação inicial, mantendo a densidade seca das amostras. O estudo demonstrou que, sob carregamento cíclico, a tensão efetiva pode diminuir, mesmo quando a saturação se mantém em torno de 80%.

A liquefação total do material ocorre quando a pressão do ar (P_a) e a pressão da água nos poros (P_w) se igualam à pressão de confinamento inicial. A equação 1, relação associada a essa condição, conforme proposta por Fredlund e Morgenstern (1977).

$$P_a = P_w \quad (1)$$

Além disso, a compressibilidade volumétrica do material é um fator-chave no cisalhamento cíclico, pois a deformação depende do histórico de deformação e não apenas do caminho de tensão do solo.

Com base nos resultados obtidos, o autor desenvolveu uma metodologia para avaliação do potencial de liquefação, subdividida em quatro etapas, representadas por um fluxograma. A figura 3, apresenta um croqui detalhando sobre o método desenvolvido no estudo.

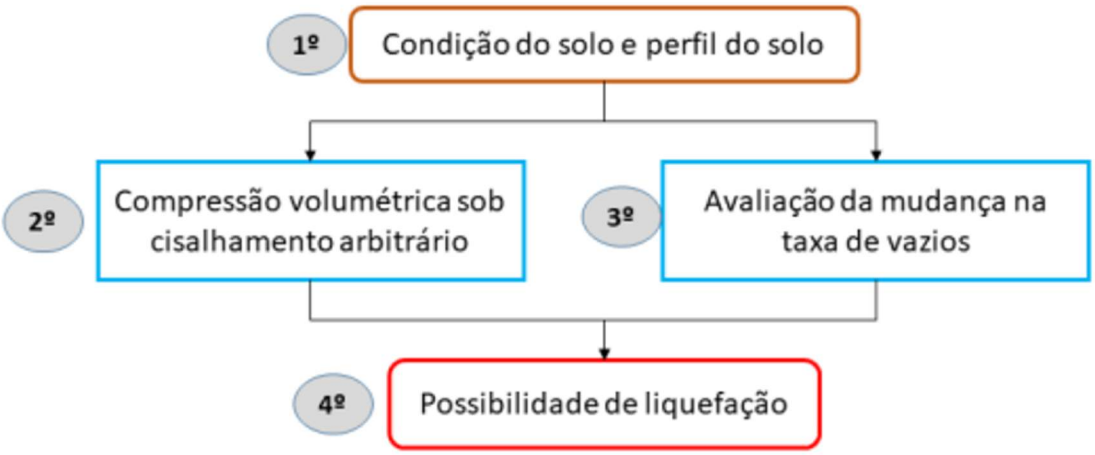


Figura 3 – Fluxograma - Método proposto. (Fonte: Adaptado de Unno et al. (2008))

Cada sistema apresentado, pode ser descrito desta forma:

1. Condição e perfil do solo: Inclui a utilização dos parâmetros de densidade seca, tensão total e velocidade da onda de cisalhamento. O grau de saturação é obtido por meio da curva característica do solo (SWCC);
2. Compressão volumétrica: Refere-se à variação da relação de vazios, obtida a partir dos ensaios de cisalhamento cíclico em condições secas;

3. Avaliação mudança da taxa de vazios: O cálculo é definido com base na relação da lei de Boyce-Charles;
4. Possibilidade de Liquefação: É analisada por meio da relação entre a variação crítica de vazios ($\Delta_{ecyclic}$) e os índices de vazios iniciais e liquefeitos ($e_0 - e_{liq}$). Destaca-se que a probabilidade de ocorrência de liquefação aumenta à medida que a diferença entre esses índices se torna maior.

Conforme descrito no item 1, anteriormente, pode-se observar na figura 4, que ilustra de forma a simplificar sobre a curva caraterística solo-água, onde demonstra a relação da redução do grau de saturação, na qual prove de forma expressiva o aumento da sucção matricial.

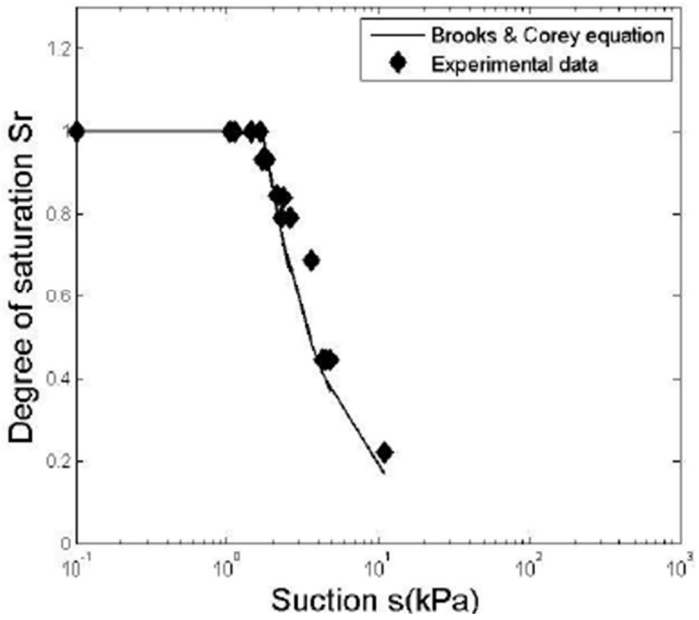


Figura 4 – Gráfico – Curva característica solo–água (SWCC). (Fonte: Adaptado de Vernay et al. (2016))

Após a aplicação da metodologia, observou-se que os resultados obtidos no estudo apresentaram boa concordância entre os dados experimentais e a teoria aplicada ao estudo.

3.3 Análise dos Resultados

Após a análise individual dos estudos selecionados, realizou-se uma avaliação comparativa entre os principais parâmetros relacionados ao processo de liquefação em solos arenosos não saturados. Ressalta-se que os dados apresentados por Unno et al. (2008) [7] não foram incluídos na análise comparativa quantitativa, devido às diferenças metodológicas adotadas no estudo.

A análise comparativa foi desenvolvida considerando a relação entre o grau de saturação (Sr) e o número de ciclos necessários para a ocorrência da liquefação, com base nos resultados obtidos por meio de ensaios triaxiais cíclicos dinâmicos. A Tabela 3, apresenta os principais parâmetros extraídos dos estudos analisados, incluindo grau de saturação, número de ciclos até a ruptura, densidade relativa, índice de vazios, tensão de confinamento efetiva inicial e tipo de material utilizado.

Tabela 3 – Tabela resumo – Parâmetros documentos referência bibliográfica. (Fonte: Autor (2026))

Doc. Referência	(S_r)	Nº Ciclos de Ruptura	Indíces de vázios	Densidade Relativa	Tensão p'0 inicial	Material
Varney (2016)	0,95	54	0,85	-	100KPa	Areia de Fontanebleau
	0,98	51		-		
	1,00	40		-		
Varney (2018)	0,90	>2000	0,85	-	100KPa	Areia de Fontanebleau
	0,95	45		-		
	0,98	30		-		
	1,00	100		-		
Shamas (2024)	0,96	7	-	71%	100KPa	Areia Hostun RF
	0,85	27	-	55%		
	0,62	47	-	56%		
Zhang (2016)	0,95	18,5	-	50%	100KPa	Areia de Toyura
	0,90	8	-	70%	46,1 kPa	Areia de Nevada

Com base nos dados apresentados na Tabela 3, foi elaborado um gráfico de dispersão utilizando o software Excel, relacionando o grau de saturação (Sr) com o número de ciclos de ruptura observados nos ensaios. A Figura 5 apresenta o comportamento comparativo entre os materiais analisados.

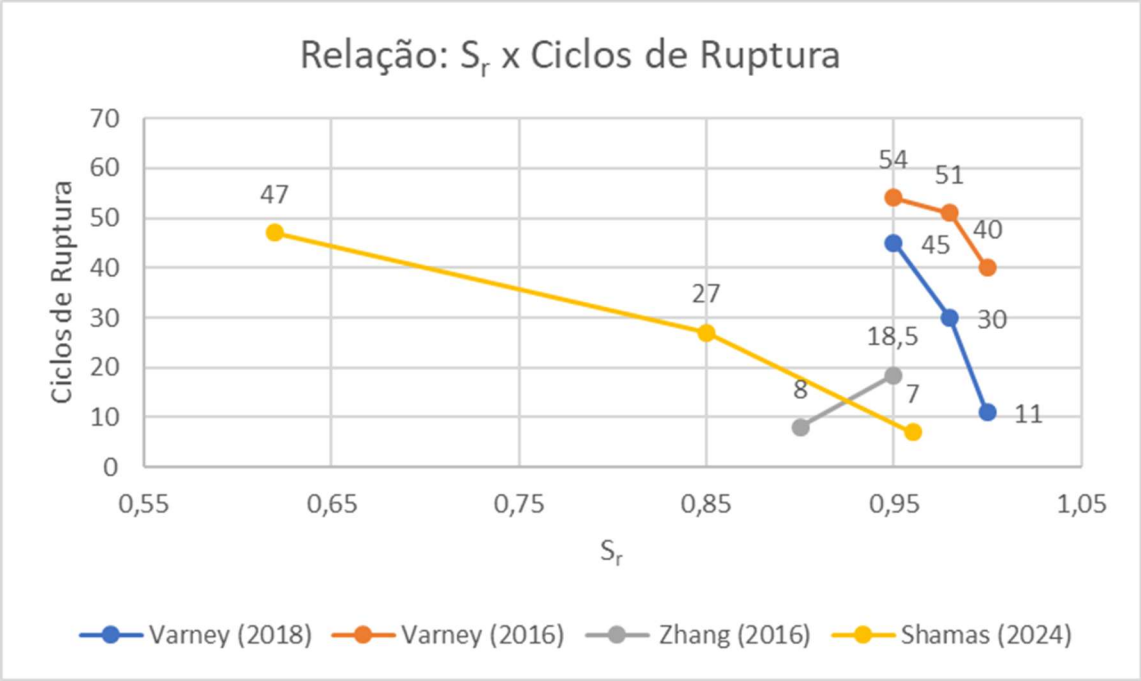


Figura 5 – Grau de Saturação (S_r) vs. Ciclos de Ruptura. (Fonte: Autor (2026))

De forma geral, os resultados indicam uma tendência consistente entre os estudos revisados, demonstrando que materiais com menores graus de saturação apresentam maior resistência à liquefação, necessitando de um maior número de ciclos para atingir a condição de ruptura. Esse comportamento foi observado principalmente nos estudos desenvolvidos por Vernay et al. (2016; 2018) [3,4] e Shamas et al. (2024) [5].

Entretanto, observa-se que a influência do grau de saturação não pode ser analisada de forma isolada, uma vez que parâmetros como densidade relativa, índice de vazios e tensão de confinamento efetiva também exercem influência significativa no comportamento mecânico do material. Dessa forma, a suscetibilidade à liquefação resulta da interação conjunta entre os parâmetros físicos e mecânicos do solo.

Os resultados apresentados por Zhang et al. (2016) [6] devem ser analisados com cautela, considerando que os ensaios foram realizados utilizando materiais distintos, areia de Toyoura e areia de Nevada, além de diferentes condições de confinamento. Essas variações dificultam comparações diretas entre os resultados obtidos para cada condição de saturação.

Destaca-se ainda que os materiais com menores graus de saturação, correspondentes a S_r=0,90 em Vernay et al. (2018) [3] e S_r=0,62 em Shamas et al. (2024) [5], não apresentaram liquefação completa durante os ensaios realizados. No caso da amostra com S_r=0,90, observou-se apenas instabilidade após elevado número de ciclos. Já para a amostra com S_r=0,62, o material permaneceu estável mesmo após sucessivos incrementos de amplitude de deformação, indicando maior resistência à liquefação sob as condições analisadas.

Os resultados obtidos reforçam a importância do grau de saturação como parâmetro fundamental na avaliação do potencial de liquefação em solos arenosos não saturados, evidenciando que a presença de ar nos vazios contribui para o aumento da resistência do material frente aos carregamentos cíclicos.

4. CONCLUSÕES

Com base nos estudos analisados, conclui-se que o processo de liquefação pode ocorrer em solos arenosos não saturados, dependendo das condições de carregamento, do grau de saturação e das características físicas e mecânicas do material. De forma geral, os resultados apresentados na literatura indicam que a redução do grau de saturação contribui para o aumento da resistência à liquefação, elevando o número de ciclos necessários para que o material atinja a condição de ruptura.

Observou-se ainda que parâmetros como densidade relativa, índice de vazios e tensão de confinamento efetiva exercem influência significativa no comportamento do solo frente aos carregamentos cíclicos, demonstrando que a suscetibilidade à liquefação não depende exclusivamente do grau de saturação.

Os estudos revisados evidenciaram que materiais parcialmente saturados podem apresentar atraso no desenvolvimento da liquefação ou até mesmo comportamento

estável sob determinadas condições de ensaio, indicando a importância da sucção e da presença de ar nos vazios na resistência do material.

Além disso, verificou-se que os ensaios triaxiais cíclicos constituem uma ferramenta fundamental para avaliação do potencial de liquefação em solos não saturados, permitindo analisar a evolução das tensões efetivas e das deformações durante os carregamentos dinâmicos.

Por fim, destaca-se que, apesar dos avanços observados nos estudos recentes, ainda existem limitações relacionadas à padronização metodológica, aos diferentes tipos de materiais analisados e à influência conjunta dos parâmetros geotécnicos envolvidos. Dessa forma, recomenda-se o desenvolvimento de novas pesquisas experimentais e numéricas voltadas à compreensão do comportamento de solos não saturados frente ao fenômeno da liquefação, especialmente em materiais com características semelhantes a rejeitos de mineração.

5. PALAVRAS-CHAVE

Liquefação; solos não saturados; arenosos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Jefferies, M.; Been, K. (2016). Soil Liquefaction. A Critical State Approach, Second Edition, London.

[2] Robertson, P.K. (2021). Evoluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration teste: na update. Canadian Geotechnical Journal. 59(4): 620–624, Canadá.

[3] Vernay, M.; Morvan, M.; Breil, P. (2018). Influence of saturation degree on soils behavior towards liquefaction. 7th International Conference on Unsaturated Soils, 1-6, Hong King.

[4] Vernay, M.; Morvan, M.; Breil, P. (2016). Mathilde (2016). Influence of saturation degree and role of suction in unsaturated soils behaviour: application to liquefaction. 3rd European Conference on Unsaturated Soils. E3S Web of Conferences, 9, 1 – 6, France.

[5] Shamas, Y.; Wenhao, H.; Imanzadeh, S. (2024). Dynamic Liquefaction Potential of Unsaturated Sand. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1 – 7, África.

[6] Zhang, B.; Kanthasamy, K.; Liu, C. (2016). Liquefaction of Unsaturated Sands.

International Journal of Geomechanics, 16 (6), 1 – 9.

[7] Unno, T. (2008). Liquefaction potential assessment for unsaturated soil based on liquefaction mechanism of unsaturated sand. World Conference on Earthquake Engineering, 1 – 8, China.



FOTO 3x4

Mariana MELO

Engenheira Civil, especialista em Engenharia de Barragens pela PUC Minas, com experiência em geotecnia aplicada à mineração e infraestrutura. Atua no desenvolvimento de projetos geotécnicos em níveis conceitual, básico e executivo de barragens, pilhas e estabilidade de taludes, além da elaboração de *As Is*, *As Built*, cartas de controle, RPSB, auditorias, tratamento de dados geotécnicos e interpretação de ensaios especiais.



FOTO 3x4

Samantha BASÍLIO

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto, pós-graduada em Segurança de Barragens pelo IDD. Atua em projetos geotécnicos aplicados à mineração. Desenvolve atividades relacionadas à sistematização de dados, análise de instrumentação geotécnica, interpretação de ensaios geotécnicos de campo e laboratório, análises de estabilidade e percolação e inspeções de estruturas.



FOTO 3x4

Vitória BORGES

Engenheira Urbana formada pela UFOP, com pós-graduação em Engenharia Geotécnica em andamento. Atua em geotecnia com foco no monitoramento e segurança de estruturas, com experiência em instrumentação geotécnica, inspeções de campo, análise de dados, *As Built,* projetos de descaracterização, interpretação de ensaios e elaboração de relatórios técnicos (EoR e RISR)

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.1
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

SEGURANÇA HIDROLÓGICA EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO: CRITÉRIOS NACIONAIS E INTERNACIONAIS SOBRE VAZÕES DE PROJETO DE EXTRAVASORES E BORDA LIVRE MÍNIMA DE RESERVATÓRIOS

Eduardo de Oliveira BUENO
Doutor em Recursos Hídricos, Consultor Sênior – Pimenta de Ávila Consultoria

Verena Maria Manolaque MEIRELLES
Engenheira Ambiental e Sanitarista – Pimenta de Ávila Consultoria

RESUMO

Este artigo analisa a evolução dos critérios normativos e regulatórios de segurança hidrológica aplicáveis a barragens de mineração no Brasil, considerando a relevância desse aspecto na redução dos riscos de galgamento e ruptura dessas estruturas. Por meio de abordagem qualitativa e comparativa de documentos normativos e regulatórios (Resoluções ANM 95/2022 e 220/2025, norma técnica ABNT NBR 13.028 versões 1993, 2006, 2017, 2024 e 2025) e diretrizes técnicas internacionais (ICOLD, CDA, ANCOLD e ICMM), o estudo foca em dois critérios hidrológicos fundamentais: borda livre mínima dos reservatórios e vazão de projeto dos extravasores. O estudo indica alinhamento ao longo dos anos entre padrões nacionais e internacionais, especialmente quanto à adoção de critérios mais conservadores de vazões de projeto e borda livre para barragens com comunidades na mancha de inundação a jusante, bem como para condição de fechamento ou descaracterização. Além disso, discute-se os avanços na definição de vazões de projeto diferenciadas conforme o dano potencial associado (DPA) e a oportunidade de melhorar critérios de borda livre mínima conforme as classes de consequências de eventual falha. Por fim, destacam-se os desafios para aplicação no Brasil das práticas internacionais, seja por limitação de dados hidrometeorológicos para escala espacial das áreas de estudo de barragens de mineração ou pela ausência de descrição mais clara das categorias de DPA no país, que permita correspondência com classificações de consequências usadas internacionalmente.

ABSTRACT

This article analyzes the evolution of normative and regulatory hydrological safety criteria applicable to mining dams in Brazil, considering the relevance of this aspect in reducing the risks of overtopping and structural failure. Through a qualitative and comparative approach of regulatory documents (ANM Resolutions 95/2022 and 220/2025, and technical standard ABNT NBR 13.028 versions 1993, 2006, 2017, 2024, and 2025) alongside international technical guidelines (ICOLD, CDA, ANCOLD, and ICMM), the study focuses on two fundamental hydrological criteria: minimum reservoir freeboard and spillway design flood. The study indicates an alignment over the years between national and international standards, especially regarding the adoption of more conservative criteria for design flows and freeboard for dams with communities located within the downstream flood map, as well as for closure or decommissioning conditions. Furthermore, it discusses advancements in defining differentiated design floods based on Potential Associated Damage (DPA) and the opportunity to improve minimum freeboard criteria according to consequence classes of a potential failure. Finally, the study highlights the challenges of applying international practices in Brazil, due to either the limitation of hydrometeorological data at the spatial scale required for mining dam study areas or the lack of a clearer description of DPA categories in the country, which would allow for better correspondence with consequence classifications used internationally.

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens de mineração ganhou maior relevância no Brasil na última década, especialmente após as rupturas de 2015 em Mariana/MG e de 2019 em Brumadinho/MG. Entre os diversos aspectos envolvidos na segurança dessas estruturas, destacam-se dois critérios hidrológicos fundamentais: a borda livre mínima (altura livre entre o nível de água maximum maximorum no reservatório e a elevação mínima da crista da barragem) e a vazão de projeto do sistema extravasor, fundamentais para garantir que a barragem seja capaz de suportar eventos extremos de precipitações e cheias, reduzindo os riscos de galgamento e ruptura.

No setor de mineração, onde o dano potencial associado à falha das estruturas em geral é elevado, com impactos sociais e ambientais que podem ser irreversíveis, esses critérios assumem ainda maior importância. Por isso, diversas organizações técnicas e regulatórias, tanto no Brasil quanto no exterior, têm se mobilizado para estabelecer critérios normativos robustos e consistentes, capazes de embasar os projetos, auditorias e obras de reforços dos barramentos. No Brasil, a Agência Nacional de Mineração (ANM) tem liderado essa agenda por meio de resoluções específicas voltadas à segurança de barragens de mineração, assim como as comissões de estudos especiais da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). No cenário internacional, instituições como a *International Commission on Large Dams* (ICOLD), a *Canadian Dam Association* (CDA) e o *International Council on Mining and Metals* (ICMM) atuam de forma proativa na formulação e publicação de diretrizes técnicas e recomendações que orientam o dimensionamento e operação segura das barragens de mineração. Esses organismos oferecem suporte técnico por meio de boletins, manuais e guias atualizados, refletindo décadas de experiência acumulada e inovação em engenharia de barragens.

Diante desse contexto, o presente artigo visa sistematizar e comparar diferentes documentos normativos, regulatórios e referências técnicas no que se refere aos critérios hidrológicos de vazão de projeto dos sistemas extravasores e de borda livre mínima dos reservatórios das barragens de mineração, importantes para redução dos riscos de galgamento e ruptura dessas estruturas. Além disso, realizou-se uma análise da evolução nas últimas décadas da normativa técnica brasileira sobre barragens de mineração (ABNT NBR 13.028), comparativamente a diferentes referências técnicas internacionais amplamente conhecidas (ICOLD [7,8], ANCOLD [4], CDA [5]) e instrumentos regulatórios de segurança de barragens de mineração no Brasil (Resoluções ANM 95/2022 [1] e 220/2025 [2] e suas alterações).

O objetivo principal do presente artigo é divulgar e fomentar o debate sobre critérios hidrológicos de segurança de barragens de mineração, conforme a legislação e normativa técnica vigente no Brasil e à luz das principais práticas internacionais, podendo inclusive subsidiar discussões para normativas e documentos regulatórios de barragens de outros setores, visando a redução de riscos de ruptura por galgamento.

2. METODOLOGIA

O estudo adotou uma abordagem qualitativa e comparativa, baseada em três etapas principais, conforme ilustra o fluxograma na Figura 1 abaixo:

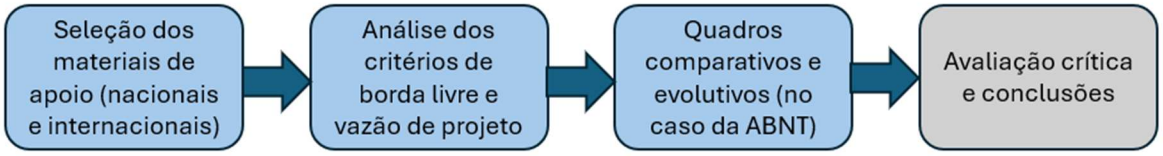


Figura 1 – Fluxograma da metodologia de trabalho.

• Seleção dos materiais: Foram analisados documentos técnicos diversos, normativos e regulatórios, como: Resolução da ANM e alterações (2022-2025), Edições da norma técnica da ABNT NBR 13.028 (1993 a 2025), com foco nas atualizações sobre vazões de projeto e borda livre, Diretrizes técnicas internacionais: ICOLD (2025), ANCOLD (2019), CDA (2019), ICMM (2020).

• Análise de critérios: Para cada documentação pesquisada, foram extraídas informações relevantes sobre: Borda livre mínima, Vazão de projeto, Condicionantes (como presença de comunidades na ZAS, consequência ou dano potencial associado).

• Quadros comparativos: Os dados foram organizados em tabelas comparativas, destacando os pontos relevantes, convergências e divergências entre a documentação consultada.

3. REFERÊNCIAS NACIONAIS

Resoluções da ANM – Agência Nacional de Mineração

A Resolução ANM Nº 95/2022 [1], com alterações dadas pelas Resoluções Nº 130/2023 e Nº 175/2024, representa o principal marco regulatório vigente para a segurança de barragens de mineração no Brasil. No seu artigo 24, ela estabelece critérios hidrológicos para o dimensionamento ou verificação dos sistemas extravasores, conforme o dano potencial associado à ruptura da estrutura (DPA) e considerando o período de operação ou de fechamento/descaracterização das barragens (Tabela 1).

Além do critério de vazão de projeto do sistema extravasor, a Resolução ANM Nº 95/2022 estabelece no seu artigo 54 a exigência de borda livre mínima de 1,0 metro ou conforme projeto, o que for maior, nos casos de barramentos cujos mapas de inundação identifique a existência de comunidade na ZAS (Zona de Autossalvamento), independentemente do DPA.

Tabela 1 – Tempo de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor – Adaptado de Resolução ANM 95/2022 [1].

Dano Potencial Associado	Período de Operação	Período de Descaracterização
Baixo	500 anos	10.000 anos ou PMP (1), o que for maior, independentemente do DPA
Médio	1.000 anos	
Alto	10.000 anos ou PMP (1)	

(1) A maior vazão de projeto entre aquela de TR 10.000 anos e a PMP (Precipitação Máxima Provável), conforme a duração crítica do sistema hidrológico avaliado.

Atendendo a exigência da Resolução CNRH 241/2024, através da Resolução ANM 220/2025 publicada em outubro de 2025, a ANM promove uma grande adequação nas medidas regulatórias aplicáveis para as barragens de mineração, revogando a resolução 95/2022 e alterações posteriores.

A Resolução ANM 220/2025 apresenta os mesmos critérios (Tabela 1) da Resolução ANM 95/2022 de tempo de retorno mínimo para o sistema extravasor para o período operacional das barragens, em consonância com o DPA da estrutura.

Em termos de borda livre, continua apresentando um critério apenas no caso de barragem em que seja identificada comunidade na ZAS e para a qual seja definida pelo poder público a realização de obras de reforço ou descaracterização, sendo igual ou maior a 1,0 metro ou conforme projeto ou estudo técnico atualizado, o que for maior.

A Resolução ANM 95/2022, no seu artigo 24 (§3º), trazia que o período de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor para o período de desativação ou descaracterização da estrutura, deve atender, independentemente do DPA, a 10.000 (dez mil) anos ou PMP (Precipitação Máxima Provável), a que for mais restritiva para a duração crítica do sistema hidrológico avaliado.

A Resolução ANM 220/2025 (artigo 23) indica que durante as obras de descaracterização o sistema extravasor deve atender aos critérios de TR (Tabela 1) em consonância com a classificação do DPA da barragem, além de ser dimensionado para manter a borda livre mínima definida em projeto para cada etapa de obra.

Portanto, não tem mais a exigência de TR 10.000 anos ou PMP (o que for maior) para o período de desativação ou descaracterização. Segundo a Resolução ANM 220/2025 o critério de projeto deve seguir a classificação de DPA da barragem.

Além disso, assim como na Resolução ANM 95/2022, a Resolução ANM 220/2025 não especifica um critério para a condição final de descaracterização das barragens (após conclusão das obras e período de monitoramento ativo e passivo), como por exemplo, 10.000 anos ou PMP (o que for maior e independentemente do DPA), conforme indicado na NBR 13.028/2025. Referências técnicas internacionais (CDA [5], ICMM [6], ICOLD [7],) recomendam também critérios mais rigorosos para projetos de fechamento das estruturas.

Em um cenário de longo prazo (pós-obras de fechamento e período de monitoramento ativo e passivo), a estrutura não estará sob a condição de controles de engenharia (inspeções, manutenções preventivas e corretivas etc.), o que pode reduzir a performance e aumentar o risco de falha das estruturas hidráulicas de condução e descargas das vazões de cheias afluentes. Soma-se a isso o fato de que, no futuro, a região a jusante de determinada barragem descaracterizada pode vir a ser ocupada ou usada permanentemente ou temporariamente por pessoas, diferente por exemplo de uma condição atual onde na ZAS não tenha comunidade, configurando assim uma condição de risco de perda de vidas humanas, e justificando critérios de projeto mais robustos.

Norma Técnica da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

A norma técnica brasileira ABNT NBR 13.028 [3], em sua evolução desde a primeira edição em 1993 até a mais recente de 2025, mostra um aprimoramento gradual dos critérios hidrológicos aplicados aos projetos de barragens de mineração. A Tabela 2 apresenta a evolução dessa normativa, em diferentes aspectos.

A 1ª edição da norma técnica ABNT NBR 13.028 [3], publicada em 1993, trazia como referência, para projetos de barragens de mineração, as diretrizes publicadas pelo ICOLD [8]. Ainda sem especificar critérios de período de retorno para vazões de projeto das estruturas extravasoras para fase de operação, essa versão da norma indicava alguns itens gerais para projetos de barragens de mineração, como a determinação de Precipitações Máximas Prováveis (PMP) locais e comparação com os valores da PMP regional; e a determinação da cheia de projeto, levando-se em consideração os aspectos do volume de reservatório, altura de barragem e riscos a jusante. A norma recomendava também como medida para desativação das barragens de mineração, a construção de extravasor de superfície livre, dimensionado para vazão correspondente à EMP (Enchente Máxima Provável).

A 2ª edição da ABNT NBR 13.028 [3], publicada em 2006, trouxe critérios mais objetivos para projetos do sistema extravasor de barragens de mineração, diferenciando por período de operação (ou construção em etapas) e de desativação, mas ainda sem fazer correlação com a consequência/dano potencial associado à ruptura do maciço, e dispensando borda livre mínima.

A 3ª edição da ABNT NBR 13.028 [3], foi publicada em 2017, portanto, publicada após a ruptura da barragem do Fundão (Mariana/MG), em novembro/2015. Essa versão da norma faz referência a diferentes guias práticos internacionais para projetos e operação de barragens de mineração (CDA [5], ANCOLD [4], ICOLD[8]), destacando como documento chave para elaboração da norma o Boletim ICOLD 139/2011 [8] - *Improving Tailings Dam Safety: Critical Aspects of Management, Design, Operation, and Closure*.

A 3ª edição da NBR 13.028 [3], apresentou pela primeira vez tempos de retorno mínimos de referência para vazões de projeto dos extravasores, no período de operação, de acordo com cada nível de consequências (ou dano potencial) esperadas dada uma falha da barragem. Além disso, foi indicado como critério de projeto de fechamento, o período de retorno de 10.000 anos ou PMP, sem deixar claro na norma que deveria ser adotado o maior quantil entre esses. Um outro ponto negativo dessa

edição era que, para o período operacional foram apresentados faixas de tempos de retorno e não valores específicos, permitindo a adoção dos limites inferiores, com destaque para um TR de apenas 1000 anos para barramentos com a classificação de consequência ou dano potencial Alto.

Tabela 2 – Evolução das edições da norma técnica ABNT NBR 13.028.

Aspecto	**1ª Edição**	**2ª Edição**	**3ª Edição**	**4ª Edição**	**5ª Edição**
Data de Publicação	Julho de 1993	Setembro de 2006	Novembro de 2017	Novembro de 2024	Dezembro de 2025
Escopo	Projetos de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração	Projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água			Dividida em 3 partes: 1 – Terminologia; 2 - Requisitos (Barragens); 3 - Pilhas de rejeitos desaguados
Extravasor - Período de Operação	Não especificado	Dimensionado para TR mínimo de 500 anos, verificado para 1.000 anos	TR mínimo, conforme DPA: Baixo: 200 a 500 anos Médio: 500 a 1.000 anos Alto: 1.000 anos a PMP	TR mínimo, conforme DPA: Baixo: 500 anos Médio: 1.000 anos Alto: 10.000 anos ou PMP	Mantém critérios da 4ª edição: TR mínimo conforme DPA (Baixo: 500 anos; Médio: 1.000 anos; Alto: 10.000 anos ou PMP, o que for mais restritivo)
Extravasor – Período de Desativação / Fechamento	EMP	PMP	TR de 10.000 anos ou PMP, o que for maior, independentemente do DPA		Mantém critérios da 4ª edição: TR 10.000 anos ou PMP, o que for mais restritivo, independente do DPA
Borda livre Mínima	Recomenda cálculo da borda livre, sem especificar critério	Sem borda livre, para os períodos de operação e desativação	Recomenda borda livre, segundo análise do projetista	Para barragens com comunidades na ZAS: maior ou igual a 1,0 metro para TR de 10.000 anos ou PMP, o que for maior, independente do DPA	Mantém critério da 4ª edição. Borda livre conforme projeto/estudo técnico atualizado ou ≥ 1,0 m, prevalecendo o mais restritivo

EMP: Enchente Máxima Provável, PMP: Precipitação Máxima Provável, DPA: Dano Potencial Associado, TR: Tempo de Recorrência ou de Retorno, ZAS: Zona de Autossalvamento.

No que se refere ao reservatório, a 3ª edição da NBR 13.028 [3] recomendava, a critério do projetista, a manutenção de borda livre acima do nível d'água maximum maximorum, fornecendo um fator de segurança contra variações de ondas e de elevação de crista e de construção.

A 4ª e atual edição da ABNT NBR 13.028 [3], datada de novembro de 2024, foi publicada após a ruptura da barragem B1 (Brumadinho/MG), em janeiro/2019. Da mesma forma que na versão anterior de 2017, é recomendado para o projeto a manutenção de borda livre acima do nível d'água maximum maximorum, fornecendo uma condição de segurança contra ondas e eventuais incertezas relacionadas ao trânsito de cheias no reservatório.

Em termos de vazão de projeto, a ABNT NBR 13.028/2024 apresenta para o período operacional critérios específicos (e não intervalos, como na edição de 2017) de tempos de retorno mínimo para o dimensionamento do sistema extravasor, no caso de barramentos classificados com DPA Baixo ou Médio. Para DPA Alto é indicado o TR de 10.000 anos ou PMP, o que for mais restritivo para o sistema hidrológico avaliado. Esse mesmo critério é recomendado para o projeto de fechamento, independentemente do DPA da estrutura.

De forma inédita entre as edições da ABNT NBR 13.028 [3], e seguindo o preconizado pela Resolução ANM 95/2022 [1], a versão de 2024 da norma técnica traz como diretriz que, independentemente do DPA, as barragens de mineração cujo mapa de inundação contemple a existência de comunidade na ZAS (zona de autossalvamento) devem apresentar borda livre mínima maior ou igual a 1,0 m para o período de retorno de 10000 anos ou PMP (precipitação máxima provável), a que for mais restritiva para a duração crítica do sistema hidrológico avaliado.

Em dezembro de 2025 a NBR 13.028 passou por uma nova revisão, deixando-a mais ampla para outras estruturas de disposição de rejeitos (como pilhas) e não apenas para barragens. Para isso, a normativa foi dividida em 3 partes: Parte 1 – Terminologia; Parte 2 – Requisitos; Parte 3 – Disposição de rejeitos desaguados em forma de pilha. No que se refere aos critérios de período de retorno da vazão de projeto dos sistemas extravasores das barragens de mineração e a borda livre mínima dos seus reservatórios, a norma de 2025 não trouxe nenhuma alteração dos critérios de projeto apresentados na versão de 2024.

4. CRITÉRIOS INTERNACIONAIS

International Commission on Large Dams - ICOLD

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) fornece diretrizes relevantes sobre segurança de barragens, inclusive do setor de mineração. A versão atual do *Tailings Dam Safety Bulletin Nº 194* (ICOLD, 2025) [7] apresenta critérios hidrológicos mínimos para vazões de projeto de barragens de mineração, de acordo com a classificação de consequência de falha da estrutura, conforme demonstrado na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Critérios hidrológicos estabelecidos no ICOLD, 2025 [7] (Adaptado por Autores).

Classificação de Consequência	Cheia de Projeto (Fase de Operação e Fechamento com Cuidado Ativo)
Baixa	TR 200 anos
Significativa	TR 1.000 anos
Alta	1/3 entre a magnitude da cheia de TR 1.000 anos e a Cheia Máxima Provável
Muito Alta	2/3 entre a magnitude da cheia de TR 1.000 anos e a Cheia Máxima Provável
Extrema	Cheia Máxima Provável (PMF)

Os critérios da Tabela 3 representam valores mínimos recomendados durante os períodos de operação e de fechamento (fase de cuidados ativos), para as diferentes classificações de consequências. Critérios mais altos são recomendados para a fase de fechamento de cuidados passivos, independentemente se a estrutura final possa não necessariamente ser considerada como uma barragem.

Em termos de borda livre, o ICOLD ressalta que existem diversos guias para barragens que apresentam métodos para calcular a altura livre necessária, recomendando o valor mínimo de 1,0 metro acima do nível máximo da cheia, como um fator de segurança contra variações de ondas, variações na elevação da crista e variações de projeto.

Australian National Committee on Large Dams - ANCOLD

Na Austrália, o Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) adota uma abordagem semelhante ao do ICOLD. De acordo com o *Guidelines on Tailings Dams: Planning, Design, Construction, Operation and Closure* (ANCOLD, 2019) [4], o critério de cheia de projeto dos extravasores de emergência depende da classificação de consequência da estrutura, variando desde TR de 100 anos até a Cheia Máxima Provável (PMF) para estruturas de risco extremo.

Segundo o ANCOLD, a borda livre mínima, deve ser dimensionada com base no cálculo da sobrelevação do nível d´água maximum maximorum gerado por rajadas de ventos com tempo de retorno de 10 anos (Tabela 4).

Tabela 4 – Critérios estabelecidos no ANCOLD, 2019 [4] (Adaptado por Autores).

Classificação de Consequência	Cheia de Projeto Recomendada	Borda Livre Recomendada
Baixa	100 anos	*Wave run-up* (1) associada à rajada de vento com tempo de retorno de 10 anos
Significativa	1.000 anos	
Alta	100.000 anos	
Extrema	Cheia Máxima Provável	Determinado por uma avaliação de risco

(1) Altura (vertical) acima do N.A. maximum maximorum alcançada pelo espraiamento da água no talude de montante do maciço devido à quebra das ondas provocadas pela ação do vento na superfície do reservatório.

Canadian Dam Association - CDA

O Canadian Dam Association Guidelines (CDA, 2019) [5] também apresenta critérios variáveis de vazões de projeto e borda livre mínima para diferentes classes de consequência das estruturas, semelhantes aos critérios do ICOLD (Tabela 5).

Tabela 5 – Critérios estabelecidos no CDA, 2019 [5] (Adaptado por Autores).

Classificação de Consequências	Tempo de Retorno da Vazão de Projeto		Borda Livre Recomendada (2)
	Operação e fechamento (cuidados ativos)	Pós-fechamento (cuidados passivos)	
Baixa	100 anos	1.000 anos	*Wave run-up* associada à rajada de vento com TR de 100 anos
Significativa	Entre 100 e 1.000 anos	1/3 entre a cheia de TR 1.000 anos e a Cheia Máxima Provável	*Wave run-up* associada à rajada de vento com TR de 10 anos
Alta	1/3 entre a cheia de TR 1.000 anos e a Cheia Máxima Provável	2/3 entre a cheia de TR 1.000 anos e a Cheia Máxima Provável	*Wave run-up* (1) associada à rajada de vento com TR de 2 anos
Muito Alta	2/3 entre a cheia de TR 1.000 anos e a Cheia Máxima Provável	Cheia Máxima Provável (PMF)	
Extrema	Cheia Máxima Provável (PMF)		

(1) Altura de onda causada pelo vento, quando o reservatório estiver no seu nível maximum maximorum durante a passagem da cheia de projeto. (2) Para barragens de concreto ou outras estruturas resistentes à erosão, a borda livre pode ser baseada em uma análise econômica de danos.

De acordo com o CDA, os intervalos para condição Pós-fechamento (cuidados passivos) apresentados na Tabela 5 para barragens de consequência Significativa e Alta ilustram que os critérios devem ser proporcionais aos danos potenciais esperados para a barragem específica. Uma avaliação de risco pode ser necessária para justificar a seleção dos critérios.

Para o CDA, a borda livre mínima deve ser tal que não haja transbordamento por ondas causadas pelo vento mais crítico, quando o reservatório estiver no seu nível maximum maximorum durante a passagem da cheia de projeto. A definição do vento mais crítico depende também da classe de consequência da barragem, com as recorrências (TR) indicados na Tabela 5.

International Council on Mining and Metals - ICMM

Após o rompimento da barragem de Brumadinho em 2019, o ICMM (International Council of Mining and Metals) elaborou e publicou em 2020 um documento com diretrizes, princípios e critérios para um padrão global da indústria para gestão de rejeitos (*Global Industry Standard on Tailings Management* - GISTM), com o objetivo principal de evitar qualquer dano às pessoas e ao meio ambiente, e com tolerância zero para fatalidades humanas (ICMM, 2020) [6].

O GISTM apresenta, de forma detalhada, indicadores de impactos para orientar o enquadramento em 5 classes de consequências (Baixa, Significativa, Alta, Muito Alta e Extrema), considerando os seguintes aspectos: população potencialmente em risco; potencial de perdas de vidas; perdas para o meio ambiente, perdas de saúde, sociais e culturais; perdas de infraestruturas e econômicas).

Entre os critérios indicados no GISTM está um associado ao tempo de retorno de inundações, que pode ser entendido como o TR da vazão de projeto das estruturas extravasoras, variável conforme a classe de consequências e a condição de operação e fechamento ou pós-fechamento da estrutura (Tabela 6). O GISTM não apresenta nenhum critério em termos de borda livre mínima no reservatório.

Tabela 6 – “Critérios de projeto para inundações” estabelecidos pelo GISTM (Adaptado de ICMM, 2020) [6].

Classificação de Consequências	**Tempo de Retorno da Vazão de Projeto**	
	Operação e fechamento (cuidados ativos)	**Pós-fechamento (cuidados passivos)**
Baixa	200 anos	10.000 anos ou PMP/IMP
Significativa	1.000 anos	10.000 anos ou PMP/IMP
Alta	2.475 anos	10.000 anos ou PMP/IMP
Muito Alta	5.000 anos	10.000 anos ou PMP/IMP
Extrema	10.000 anos ou PMP/IMP	10.000 anos ou PMP/IMP

(1) “Precipitação Máxima Provável” (PMP) ou “Inundação Máxima Provável” (IMP) são aceitáveis se igualarem ou excederem o critério de TR 10.000 anos.

5. DISCUSSÕES

A Tabela 7 resume e compara os principais critérios de vazão de projeto do sistema extravasor e borda livre mínima para barragens de mineração, conforme indicado nas referências técnicas nacionais e internacionais avaliadas no presente artigo.

Tabela 7 – Critérios de vazão de projeto do sistema extravasor e borda livre mínima para barragens de mineração, conforme indicado nas referências nacionais e internacionais avaliadas.

Referência	Classificação de Consequência / DPA	Critério da Vazão de Projeto do Extravasor	Critério de Borda Livre Mínima no Reservatório
Brasil - Resolução ANM Nº 95/2022 [1]	DPA Baixo, Médio e Alto	TR 500 anos a 10.000 anos ou PMP (o que for maior)	≥ 1,0 m ou conforme projeto, o que for maior, no caso de existência de comunidade na ZAS
Brasil – Resolução ANM Nº 220/2025 [2]	DPA Baixo, Médio e Alto	TR 1.000 anos a 10.000 anos ou PMP (o que for mais restritivo)	≥ 1,0 m ou conforme projeto/estudo técnico, o que for mais restritivo, para barragens com comunidade na ZAS, independentemente do DPA
Brasil – ABNT NBR 13.028:2025 (Parte 2) [3]	DPA Baixo, Médio e Alto	TR 500 anos a 10.000 anos ou PMP (o que for mais restritivo)	≥ 1,0 m para TR 10.000 anos ou PMP (o que for maior), no caso de existência de comunidade na ZAS, independentemente do DPA
Austrália - ANCOLD (2019) [4]	Baixa a Extrema	TR 100 anos a Cheia Máxima Provável	*Wave run-up* associada à rajada de vento com TR de 10 anos
Canadá - CDA (2019) [5]	Baixa a Extrema	TR 100 anos a Cheia Máxima Provável	*Wave run-up* associada à rajada de vento com TR de 2 a 100 anos, conforme classe de DPA
Internacional - GISTM (ICMM, 2020) [6]	Baixa a Extrema	TR 200 anos a 10.000 anos ou PMP (operação e pós-fechamento)	Não especifica
Internacional - ICOLD Bulletin 194 (2025) [7]	Baixa a Extrema	TR 200 anos a Cheia Máxima Provável	≥ 1,0 metro

A norma técnica brasileira ABNT NBR 13.028 [3], em sua evolução desde a primeira edição em 1993 até a mais recente em 2025, mostra um aprimoramento gradual dos critérios hidrológicos aplicados aos projetos de barragens de mineração. Enquanto a versão inicial referenciava apenas a Enchente Máxima Provável (EMP) como critério de cálculo de extravasores para desativação das barragens, a versão mais recente introduz critérios mais conservadores e robustos. Dentre as mudanças, destaca-se a exigência de borda livre mínima de 1,0 m para cheia de TR 10.000 anos ou PMP, o que for maior, no caso de barragens com presença de comunidades na ZAS, independentemente do DPA; e a obrigatoriedade de utilizar a PMP ou um período de retorno de 10.000 anos, o que for maior, como critério para a vazão de projeto de extravasores de estruturas com DPA Alto e para os projetos de fechamento/descaracterização das barragens. Essas exigências demonstram uma aproximação da norma brasileira aos critérios técnicos internacionais.

A análise comparativa entre as referências nacionais e internacionais evidencia tanto avanços quanto lacunas na consolidação de critérios hidrológicos para a segurança de barragens de mineração no país. Um dos principais desafios identificados é compatibilizar os critérios normativos e regulatórios do Brasil com os guias de boas práticas e boletins internacionais, seja por questões metodológicas de cálculos que requerem o monitoramento e disponibilidade de dados fluviométricos (vazões) e meteorológicos (vento) na escala espacial das bacias hidrográficas de contribuição às barragens de mineração; ou por uma simples compatibilidade entre a quantidade e definição clara das classes de consequências ou dano potencial associado à falha das estruturas.

Normas de países como Canadá e Austrália baseiam seus critérios em dados fluviométricos e meteorológicos extensos, permitindo o uso de abordagens como a Cheia Máxima Provável (CMP) e o cálculo de borda livre baseado em análise probabilística robusta. No Brasil, por outro lado, a carência de séries históricas de vazões confiáveis, principalmente em pequenas áreas de mineração, impõe limitações importantes. Em função disso, opta-se com frequência pelo uso da Precipitação Máxima Provável (PMP) em modelos chuva-vazão, muitas vezes um critério mais conservador. Essa diferença metodológica dificulta a adoção direta de critérios internacionais e exige adaptações que considerem a realidade técnica e institucional do país.

Outro aspecto que impacta a comparação com as normas estrangeiras é a quantidade de classes de consequência adotadas e a clareza nos critérios que as definem. Documentos internacionais, como os boletins da ICOLD [7] ou as diretrizes do GISTM (ICMM [6]), adotam cinco ou mais classes de risco, com descritores bem estabelecidos e métricas específicas (como vidas potencialmente afetadas, impactos ambientais e socioeconômicos). No Brasil, a classificação presente na ABNT NBR 13.028/2025 e Resolução ANM 95/2022 é menos segmentada (três classes principais) e, por vezes, carece de parâmetros objetivos claros, o que pode comprometer tanto o enquadramento da barragem quanto a definição da vazão de projeto e da borda livre associadas.

6. CONCLUSÕES

Ao longo dos mais de 30 anos desde a sua primeira edição em 1993, a norma técnica ABNT NBR 13.028 apresentou uma notória evolução em termos de critérios mais claros e robustos de tempos de retorno de vazões de projeto dos sistemas extravasores das barragens de mineração, sobretudo nas últimas versões, publicadas após as rupturas da barragem do Fundão (Mariana/MG) em 2015 e da barragem B1 (Brumadinho/MG) em 2019. Da mesma forma, é notória a evolução da regulação brasileira sobre segurança de barragens do setor de mineração, em especial com a publicação da Resolução ANM 95/2022 [1], com destaque para diferenciação de critérios hidrológicos conforme a classificação do dano potencial (consequências) associado à ruptura das estruturas. Esse aprimoramento dos critérios hidrológicos da ABNT NBR 13.028 [3] e da Resolução da ANM, seguiu muito bem as atualizações observadas nas últimas décadas nos guidelines e boletins técnicos internacionais sobre segurança de barragens de mineração.

No que diz respeito à borda livre mínima dos barramentos, quando da ocorrência de eventos de chuvas e cheias extremas, a versão de 2024 da norma técnica ABNT NBR 13.028 traz pela primeira vez um critério específico e rigoroso (maior ou igual a 1,0 m, para o período de retorno de 10.000 anos ou PMP, o que for maior, independente do DPA) para as barragens de mineração cujo mapa de inundação contemple a existência de comunidade na ZAS (zona de autossalvamento). Esse critério de borda livre mínima incorporado na ABNT NBR 13.028/2024, assim como já tinha sido especificado na Resolução ANM 95/2022 e mantido na Resolução ANM 220/2025 [2], é de suma importância para redução dos riscos de galgamento e, consequentemente, aumento da segurança hidrológica-hidráulica das barragens de mineração e da população a jusante. Entende-se, como oportunidade de melhoria nas próximas revisões da normativa técnica e documentação regulatória da segurança de barragens de mineração, a indicação de critérios de borda livre mínima também para barramentos que não necessariamente apresentam a condição de pessoas permanentemente e/ou temporariamente dentro da mancha de inundação. Esses critérios podem ser baseados no que já é preconizado em algumas referências técnicas internacionais (ANCOLD [4], CDA [5]), conforme apresentado no presente artigo, especialmente diferenciando de acordo com a classificação do DPA das estruturas.

Destaca-se na NBR 13.028 (versões de 2024 e 2025) [3], alinhado com algumas referências técnicas internacionais (CDA [5], ICMM [6], ICOLD [7]), a recomendação de critérios mais rigorosos para o dimensionamento das estruturas extravasoras dos projetos de fechamento ou descaracterização das barragens, independentemente do DPA, o que representa um aspecto muito importante tendo em vista a ausência de controles de engenharia (inspeções e manutenções, por exemplo) após a conclusão das obras e período de monitoramento ativo e passivo dessas estruturas que serão “entregues” para a natureza e, em alguns casos, permitindo o acesso público de pessoas a jusante, conforme os usos futuros pretendidos. Por outro lado, apesar de trazer critérios para o período de desativação ou descaracterização das estruturas (durante as etapas de obras), as resoluções 95/2022 [1] e 220/2025 [2] da ANM não especificam critérios de projeto para a condição final de fechamento das barragens de mineração, o que pode ser representar uma fragilidade na segurança hidrológica-

hidráulica dessas estruturas a longo prazo e, portanto, uma oportunidade também de melhoria nas novas ou próximas versões das resoluções da agência reguladora sobre barragens de mineração.

Por fim, é importante ressaltar que os critérios exigidos pela legislação brasileira ou indicados pelas normativas técnicas nacionais, assim como aqueles recomendados por diretrizes internacionais, devem ser entendidos como complementares e não excludentes. Além disso, independente dos valores indicados nesse conjunto de documentação técnica e legal, é de suma importância que sempre haja um julgamento de engenharia para definir de forma mais adequada os melhores critérios de projeto, em prol da maior segurança das barragens de mineração.

7. PALAVRAS-CHAVE

Vazões de projeto, extravasores, reservatórios, borda livre mínima, mineração.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANM. (2022). Resolução Nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Estabelece critérios para a classificação, fiscalização e segurança de barragens de mineração, com alterações pelas Resoluções ANM Nº 130/2023 e Nº 175/2024. Agência Nacional de Mineração, Brasília, Brasil.

[2] ANM. (2025). Resolução Nº 220, de 16 de outubro de 2025. Estabelece a disciplina aplicável às barragens de mineração. Agência Nacional de Mineração, Brasília, Brasil. Vigência a partir de 02/08/2027.

[3] ABNT. (1993, 2006, 2017, 2024, 2025). NBR 13.028 – Mineração: Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas. [5ª edição (2025) dividida em: NBR 13028-1 (Terminologia), NBR 13028-2 (Requisitos), NBR 13028-3 (Pilhas de rejeitos desaguados)].

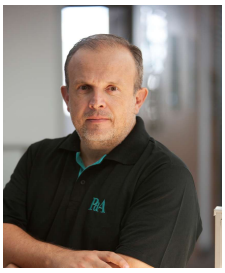
[4] ANCOLD. (2019). Guidelines on Tailings Dams: Planning, Design, Construction, Operation and Closure. Australian National Committee on Large Dams, Inc.

[5] CDA. (2019). Technical Bulletin: Dam Safety Guidelines. Canadian Dam Association.

[6] ICMM. (2020). Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM). International Council on Mining and Metals.

[7] ICOLD. (2025). Bulletin 194 – Tailings Dam Safety. International Commission on Large Dams.

[8] ICOLD. (2011). Bulletin 139 – Improving Tailings Dam Safety: Critical Aspects of Management, Design, Operation, and Closure. International Commission on Large Dams.



Eduardo BUENO

Graduado em engenharia civil pela Universidade Federal de Minas Gerais, especialização em recursos hídricos e saneamento ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mestrado e doutorado em recursos hídricos e sistemas agrícolas pela Universidade Federal de Lavras, e diversos cursos de capacitação. Tem ampla experiência profissional na área de gestão dos recursos hídricos, drenagem urbana, mineração, hidráulica e hidrologia em geral.



Verena MEIRELLES

Graduada em Engenharia Ambiental e Sanitária (UFAL) e pós-graduada em Recursos Hídricos aplicados à Mineração. Com experiência no setor de engenharia e pesquisas na área de recursos hídricos. Coordenou a Comissão Técnica Jovem da ABRHidro (2024/2025), e atuou em projetos nacionais socioambientais focados em saneamento e resiliência climática.

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

SEMANA DE BARRAGENS 2026 DAMSWEEK 2026

GE.2 Técnicas e inovações na construção de estruturas de barragens e TSFs

Ana Luisa Cezar Rissoli – Vale SA

Estrutura Relatoria

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

01 Artigos GE.2

02 Principais Temas Abordados

03 Gaps e Oportunidades

04 Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

1- Artigos GE-02

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

8 artigos
Mineração
6 rejeitos filtrados

VALE

SAMARCO

Hydro

Relatora: Ana Rissoli

Comissão Técnica: Ronaldo Pantoja e João Wendell

Controle tecnológico, qualidade da execução e inovação operacional aplicados a estruturas de disposição de rejeitos ou resíduos filtrados.

2- Principais Temas Abordados

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

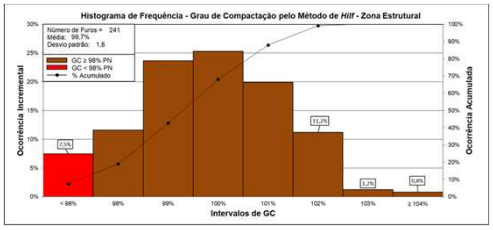
- Controle tecnológico e qualidade da construção

Controle de compactação

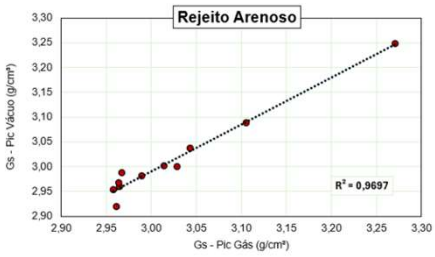
Ensaios geotécnicos de campo e laboratório

Aderência Projeto x Obra

Gestão de não conformidades



Damasceno et al, 2026



Bretas et al, 2026

2- Principais Temas Abordados

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

- Rejeitos filtrados e empilhamento

Compactação em condições úmidas

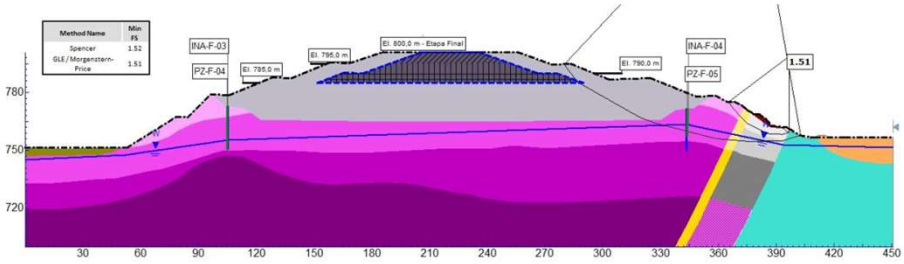
Zoneamento operacional

Operação assistida

Otimização do desempenho geotécnico



Azevedo et al, 2026



Azevedo et al, 2026

2- Principais Temas Abordados

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

- Governança e digitalização

QA/QC digital

Gestão integrada de dados

Dashboards e rastreabilidade

Suporte à tomada de decisão



Lacerda et al, 2026



Lacerda et al, 2026



Thums et al, 2026

2- Principais Temas Abordados

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

- Inovação operacional

Operação remota

Equipamentos especiais

Reaproveitamento de materiais



Lima et al, 2026



Barbosa et al, 2026

- Segurança operacional e HSE

Redução da exposição humana

Segurança hídrica

Confiabilidade operacional

3 – Gaps e Oportunidades

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

- Participação de trabalhos relacionados a hidroelétricas e outras barragens em obras

MR.1 Usinas Reversíveis

IN.4 Automatização e novas tecnologias de monitoramento

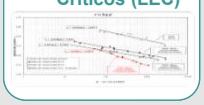
- Tecnologias de compactação e redução de umidade
- Disposição de Rejeitos Ultrafinos filtrados, exigirão tecnologia de secagem, compactação e acompanhamento. Tratado somente pela Hydro, mas desafio para demais mineradoras.
- Ensaios mais ágeis para controle QA/QC de barragens e TSF, especialmente com altas taxas de liberação.

4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Ensaios de caracterização

Filtragem → Amostragem → Linha dos Estados Críticos (LEC)

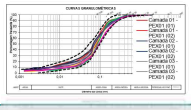


Projeto

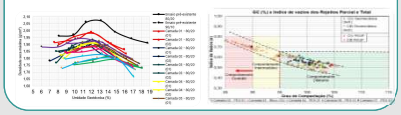
Definição de Tensão de projeto → Índices de vazios máximos → Check com LEC de Projeto

Aterro Experimental

Faixa Granulométrica Operação



→ GC x Índice de vazios de campo

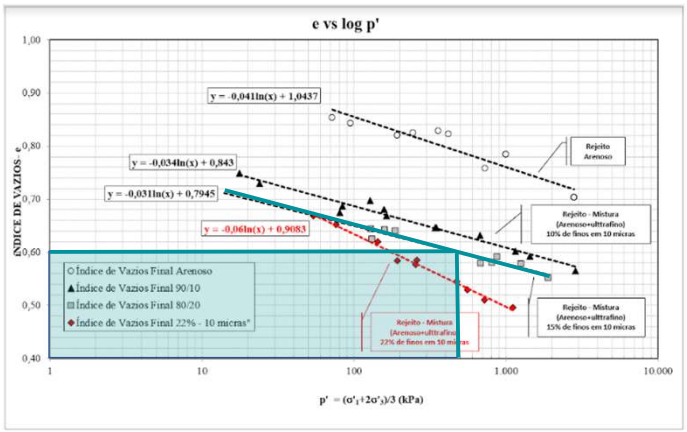


Check Tecnologias e Inovações

4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

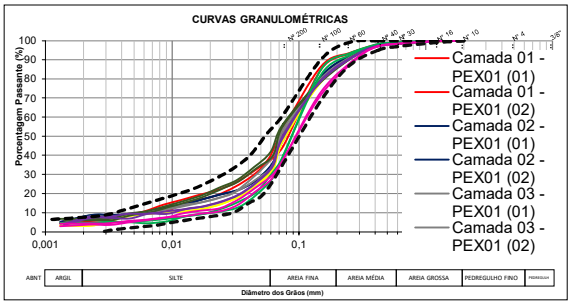
Linha dos Estados Críticos



4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

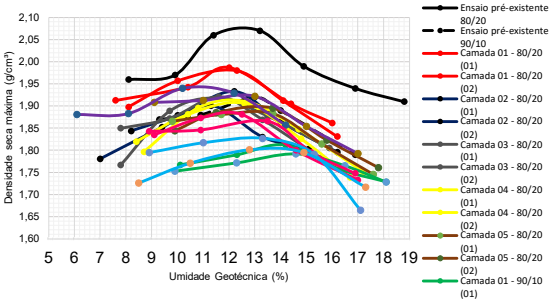
Faixa de Granulometria Operação

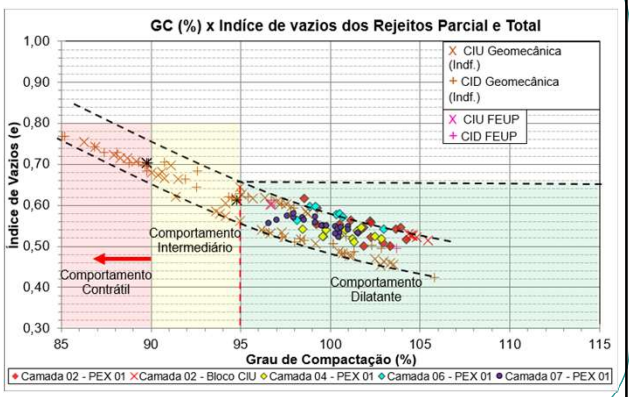


4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

GC x Índices de vazios de campo





Pilha de Rejeito e Estéril

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS



4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Testes

- Rejeito total 80/20 e 90/10 (total e parcial)
- Rejeito arenoso
- Rejeito + cal
- Rejeito + cimento



4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Caracterização

- Ensaios laboratoriais → Umidade ótima, Comportamento, Linha dos Estados Críticos

Aterros Experimentais

- Faixas granulométricas
- Eficiência e estabilidade de Filtragem
- Umidade de Trafegabilidade de Equipamentos
- Espessura das camadas
- Especificação do rolo compactador
- Geração de particulados
- Comportamento após eventos chuvosos
- Parâmetros de eficiência
- Perda de umidade
- Construtibilidade
- Tempo de ciclo

4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Caracterização

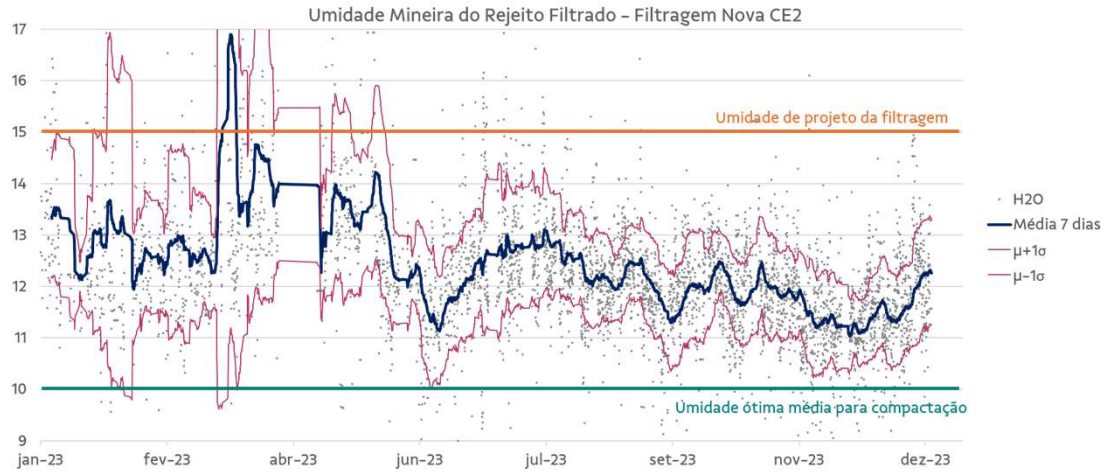
- Ensaios laboratoriais → Umidade ótima, Comportamento, Linha dos Estados Críticos

Aterros Experimentais

- Faixas granulométricas
- Eficiência e estabilidade de Filtragem
- Umidade de Trafegabilidade de Equipamentos
- Espessura das camadas
- Especificação do rolo compactador
- Geração de particulados
- Comportamento após eventos chuvosos
- Parâmetros de eficiência
- Perda de umidade
- Construtibilidade
- Tempo de ciclo

4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS



4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Caracterização

- Ensaios laboratoriais ⟩ Umidade ótima, Comportamento, Linha dos Estados Críticos

Aterros Experimentais

- Faixas granulométricas
- Eficiência e estabilidade de Filtragem
- Umidade de Trafegabilidade de Equipamentos
- Espessura das camadas
- Especificação do rolo compactador
- Geração de particulados
- Comportamento após eventos chuvosos
- Parâmetros de eficiência
- Perda de umidade
- Construtibilidade
- Tempo de ciclo



4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Caracterização

- Ensaios laboratoriais → Umidade ótima, Comportamento, Linha dos Estados Críticos

Aterros Experimentais

- Faixas granulométricas
- Eficiência e estabilidade de Filtragem
- Umidade de Trafegabilidade de Equipamentos
- Espessura das camadas
- Especificação do rolo compactador
- Geração de particulados
- Comportamento após eventos chuvosos
- Parâmetros de eficiência
- Perda de umidade
- Construtibilidade
- Tempo de ciclo

Arado aiveca Ikeda Teste Aterro Experimental



4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Caracterização

- Ensaios laboratoriais → Umidade ótima, Comportamento, Linha dos Estados Críticos

Aterros Experimentais

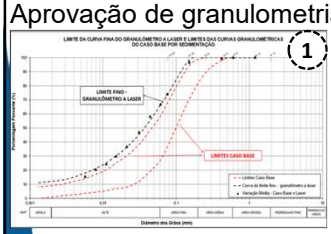
- Faixas granulométricas
- Eficiência e estabilidade de Filtragem
- Umidade de Trafegabilidade de Equipamentos
- Espessura das camadas
- Especificação do rolo compactador
- Geração de particulados
- Comportamento após eventos chuvosos
- Parâmetros de eficiência
- Perda de umidade
- Construtibilidade
- Tempo de ciclo

Projetos de Pilhas de Rejeito Manual de Operação

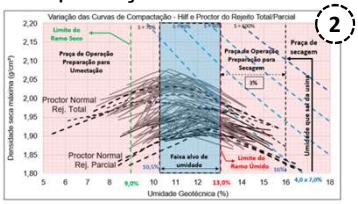
4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Aprovação de granulometria



Aprovação de umidade



Inspeção visual



Aprovação Compactação



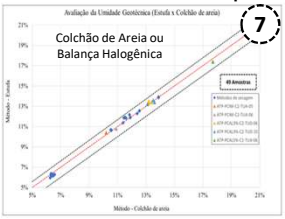
Densidade in situ



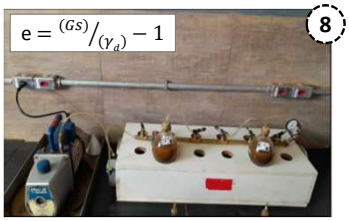
Densidade úmida



Umidade de campo



Densidade dos Grãos - Gs



Aprovação da Camada → Densidade Seca $\gamma s \geq 1{,}95$ g/cm³ → Índice de Vazios $e \leq 0{,}60$ → Saturação $S < 80\%$

Fonte: BVP 2024

4 – Conexão Construção e Projeto – Pilhas de Rejeito

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS



Muito obrigada!

ana.rissoli@vale.com



CIGB ICOLD CBDB

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS

www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.2
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

CONTROLE DE QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO DE UM ATERRO COMPACTADO DE UMA BARRAGEM

Vanessa Luiza THUMS
Engenheira Sênior - VALE

Tadeu Marçal MIRANDA
Gerente Técnico Gestão de Rejeitos - VALE

Marcus Vinicius Alves POLAZZI
Especialista Implantação de Projetos – VALE

RESUMO

Obras de terraplanagem exigem um controle tecnológico robusto e detalhado, visando a mitigação de possíveis anomalias geotécnicas que possam ocorrer ao longo da vida útil da estrutura construída, como trincas, erosões e solapamentos. Usualmente, os projetos apresentam como principal controle de qualidade a execução de ensaios de campo e de laboratório durante a construção com o objetivo de acompanhar e certificar que a execução seja realizada com qualidade e dentro dos parâmetros esperados pelo projeto. Além de ensaios, a metodologia executiva do engenheiro ou área responsável pela implantação das obras deve garantir qualidade nos controles executivos, a organização em campo para assegurar a segurança e garantir a execução efetiva e eficiente dos trabalhos e a consolidação constante dos dados gerados, certificando que a construção está sendo realizada conforme previsto.

Este trabalho tem como objetivo apresentar os controles de qualidade definidos e utilizados para a execução do aterro compactado em uma obra de alteamento a jusante de uma barragem de terra. Além dos controles usualmente aplicados com ensaios geotécnicos, serão apresentados os processos de acompanhamento executivos com uso de programas internos e externos, bem como gestão de rotina que garante a qualidade da obra. A integração de boas práticas à implantação de obras transforma o controle de qualidade em parte orgânica do processo construtivo, resultando em obras mais confiáveis e com maior rastreabilidade das informações. As atividades são acompanhadas por equipes multidisciplinares, com alinhamentos contínuos e procedimentos que visam a diminuição de erros humanos e retrabalhos.

ABSTRACT

Earthmoving work requires robust and detailed technological control, aiming to mitigate possible geotechnical anomalies that may occur throughout the life of the constructed structure, such as cracks, erosion, and boreholes. Usually, projects present as the main quality control the execution of field and laboratory tests during construction with the objective of monitoring and certifying that the execution is carried out with quality and within the parameters expected by the project. In addition to tests, the executive methodology of the engineer or area responsible for the implementation of the works must guarantee quality in the executive controls, the organization in the field to ensure safety and guarantee the effective and efficient execution of the works, and the constant consolidation of the generated data, certifying that the construction is being carried out as planned.

This work aims to present the quality controls defined and used for the execution of the compacted embankment in a downstream raising project of an earth dam. In addition to the controls usually applied with geotechnical tests, the presentation will cover executive monitoring processes using outsourced and internal software, and a routine management that ensures the quality of the work. Integrating best practices into the implementation of projects transforms quality control into an organic part of the construction process, resulting in more reliable projects with greater traceability of information. The activities are followed by multidisciplinary teams, with continuous alignment and procedures that aim to reduce human error and rework.

1. INTRODUÇÃO

A construção de barragens em solo compactado exige um rigoroso controle de qualidade para garantir a segurança, a estabilidade e o desempenho da estrutura ao longo de sua vida útil. Como essas obras envolvem grandes volumes de material e estão sujeitas a solicitações hidráulicas e geotécnicas significativas, qualquer falha no processo construtivo pode resultar anomalias como deformações excessivas, infiltrações ou até rupturas. Nesse contexto, o controle de qualidade do aterro compactado torna-se um elemento essencial, assegurando que os materiais empregados, os métodos de execução e os parâmetros de compactação atendam às especificações de projeto e às normas técnicas vigentes. A adoção de práticas adequadas de controle tecnológico não apenas reduz riscos, mas também contribui para a eficiência construtiva e para a confiabilidade da barragem como um todo.

Este artigo irá apresentar as boas práticas adotadas na construção de um aterro compactado de uma barragem que está em processo de alteamento. As obras ocorrem somente durante o período de estiagem (abril a outubro), em dias úteis e durante horário administrativo estendido (7 as 19hrs).

2. DESENVOLVIMENTO

O controle de qualidade na construção de um aterro compactado de barragem envolve um conjunto de procedimentos sistemáticos que asseguram a conformidade da obra com o projeto executivo e com as normas técnicas aplicáveis. Esse processo é multidisciplinar e integra verificações de campo, ensaios laboratoriais, auditorias internas, reuniões técnicas e uso de tecnologias modernas para monitoramento e rastreabilidade.

Em 2020 foi publicado o Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos (GISTM) pelo Conselho Internacional de Metais e Mineração do Canadá (ICMM), que apresenta requisitos que subsidiam as melhores práticas para concepção, construção e operação de barragens de rejeitos com segurança. Os requerimentos do GISTM associados às atividades de construção de estruturas geotécnicas devem ser atendidos, além de legislações de órgãos externos e procedimentos normativos internos da empresa.

2.1 Atendimento às legislações e normativos

A construção de uma estrutura geotécnica deve atender diversas legislações federais e normativos internos e externos para conformidade construtiva. A seguir são listados alguns dos requerimentos relacionados à construção nas principais referências de legislação federal e do normativo global para gestão de estruturas de rejeito.

Resolução nº 95, de 07 de fevereiro de 2022, ANM [1]:

- Requer o cadastro de barragens de mineração em construção conforme parágrafo 1º do Art. 3;

- Requer documentação mínima da estrutura no Plano de Segurança de Barragem (PSB), como o *As Built* (parágrafo 2º do Art. 10);
- Solicita a avaliação de aderência entre projeto e construção na elaboração do Relatório de Revisão Periódica de Segurança da Barragem (RPSB) no item VI do Art. 15;
- Estabelece restrições construtivas como a proibição da construção e alteamentos de barragens de mineração pelo método "a montante" (parágrafo 5º do Art. 1) e a implantação de novas barragens de mineração cujo mapa de inundação identifique a existência de comunidade na ZAS (Art. 54).

GISTM (Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos), 2020, ICMM [2]:

O normativo é apresentado em 15 princípios, desdobrados em 77 requisitos que cobrem todo o ciclo de vida de uma barragem, desde o planejamento até o fechamento. Os principais requisitos relacionados à construção de uma barragem são os apresentados a seguir (4, 5 e 6).

- Princípio 4: desenvolver planos e critérios de projeto para a estruturas de disposição de rejeitos no sentido de minimizar riscos em todas as fases do seu ciclo da vida, inclusive nas fases de fechamento e pós-fechamento.
- Princípio 5: desenvolver um projeto robusto que integre a base de conhecimentos e minimize o risco de falhas que possam atingir as pessoas e o meio ambiente em todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive nas fases de fechamento e pós-fechamento.
- Princípio 6: planejar, construir e operar a estrutura de disposição de rejeitos de modo a garantir a gestão de riscos em todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, incluindo nas fases de fechamento e pós-fechamento.

No contexto das obras de construção pode ser considerado como complemento o princípio 10 que é relacionado a análise de riscos durante a elaboração do projeto e execução das obras. A Vale aplica a metodologia de análise de modos de falha e seus efeitos (FMEA) que deve ser revisada com uma periodicidade de acordo com a complexidade da estrutura. A estrutura objeto desde estudo possui atualização da análise de riscos a cada 2 anos.

- Princípio 10: estabelecer e implementar níveis de revisão como parte de um sistema robusto de gestão da qualidade e de riscos para todas as fases do ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, inclusive na fase de fechamento.

Além disso, anualmente os riscos, as oportunidades e as possíveis ameaças que ocorrer durante a execução da obra são reavaliados de forma a mitigar situações desfavoráveis, atrasos no cronograma e alterações no CapEx e OpEx das atividades.

2.2 Governança e responsabilidades

A elaboração do Projeto Detalhado e a sua execução em campo ocorre com o trabalho multidisciplinar de diversas equipes envolvidas. O GISTM estabelece no princípio 8 que haja um sistema adequado de governança e responsabilidades para apoiar a segurança e a integridade das estruturas geotécnicas, sendo importante a designação um Engenheiro Responsável pelas Estruturas de disposição de rejeitos (RTFE) (requisito 8.5) e a designação e habilitação de um Engenheiro de Registro (EOR) (princípio 9) sendo os principais profissionais relacionados à gestão de segurança da estrutura geotécnica. A Figura 1 apresenta a governança estabelecida para a execução e acompanhamento das obras do estudo de caso deste trabalho.

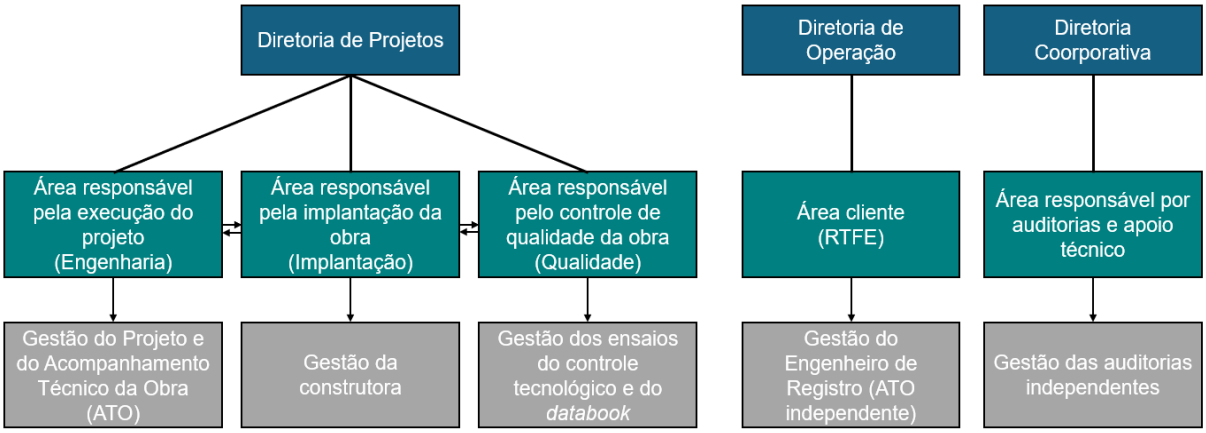


Figura 1 - Governança para a execução das obras do aterro compactado.

Como é possível observar, a governança estabelecida mantém a área do cliente solicitante e a área das auditorias e apoio técnico com responsabilidades independentes, sem conflito de interesse com a área responsável por elaborar o Projeto Detalhado e a área de execução das obras em campo. Esta configuração é importante para manter a autonomia dos interesses de cada área.

Importante ressaltar que a área cliente, representada pelo RTFE, possui a gestão do Engenheiro de Registro e ambos serão responsáveis por receber o *databook* da obra e aprovar a documentação do *As Built* (“Como construído”) após sua conclusão conforme requisito 6.3 do GISTM. O *databook* se trata da consolidação de todos os documentos e registros ocorridos durante a execução das atividades e é o principal subsídio para a elaboração do *As Built.*

O EOR possui um ATO independente que acompanha a execução das obras, sem apresentar caráter de fiscalização. O objetivo é que o EOR possa monitorar a implementação efetiva do projeto e, quando necessário, orientar a utilização das boas práticas de engenharia pela empresa responsável pela construção.

2.3 Controle de alterações no projeto

O projeto desenvolvido para a execução da obra passou por todas as etapas de desenvolvimento (Projeto Conceitual, Básico e Detalhado), com participação de *stakeholders* e consultores em fóruns técnicos de avaliação após a conclusão de cada nível.

Quando o projeto em sua fase detalhada é aprovado, ele passa para a condição “para construção”, contendo todos os detalhes construtivos e informações acerca de materiais e sequência executiva. Entretanto, por mais que o projeto tenha como objetivo apresentar todas as informações necessárias para a execução, é comum que durante a fase das obras seja necessário o esclarecimento de dúvidas e alterações nas condições estabelecidas, devido diversos motivos como:

- Alterações nas condições de campo pré-estabelecidas;
- Ajustes executivos conforme premissas da construtora;
- Adequações na geometria ou volume;
- Ajustes nos materiais caso haja variação ao longo das escavações ou no fornecimento;
- Novas tecnologias após a conclusão do projeto;
- Novas legislações ou requisições legais após a conclusão do projeto;
- Ajuste na instrumentação, entre outros.

O ganho de maturidade durante a execução de obras é individual e acaba proporcionando alguns ajustes no projeto, normalmente de forma positiva. A gestão de alterações executivas do projeto deste artigo é registrada em Notas de Alterações de Projeto (NAPs) e a construtora pode solicitar esclarecimentos e indicar propostas construtivas para a empresa Projetista em Solicitações de Informações Técnicas (SITs). SITs podem gerar NAPs caso as indicações da construtora sejam atendidas e apresentem alterações executivas ou que sejam significativas no projeto. Todos esses documentos irão compor o *As Built* da estrutura após a conclusão das obras.

O controle de emissão e registro desses documentos é realizado um sistema interno desenvolvido para gestão das etapas de cadastro, resposta e validação das pessoas envolvidas neste processo (Figura 2 e Figura 3). Após a conclusão da tramitação neste sistema, o documento é formalmente emitido com numeração padrão e compartilhado com os demais profissionais envolvidos na obra para conhecimento.

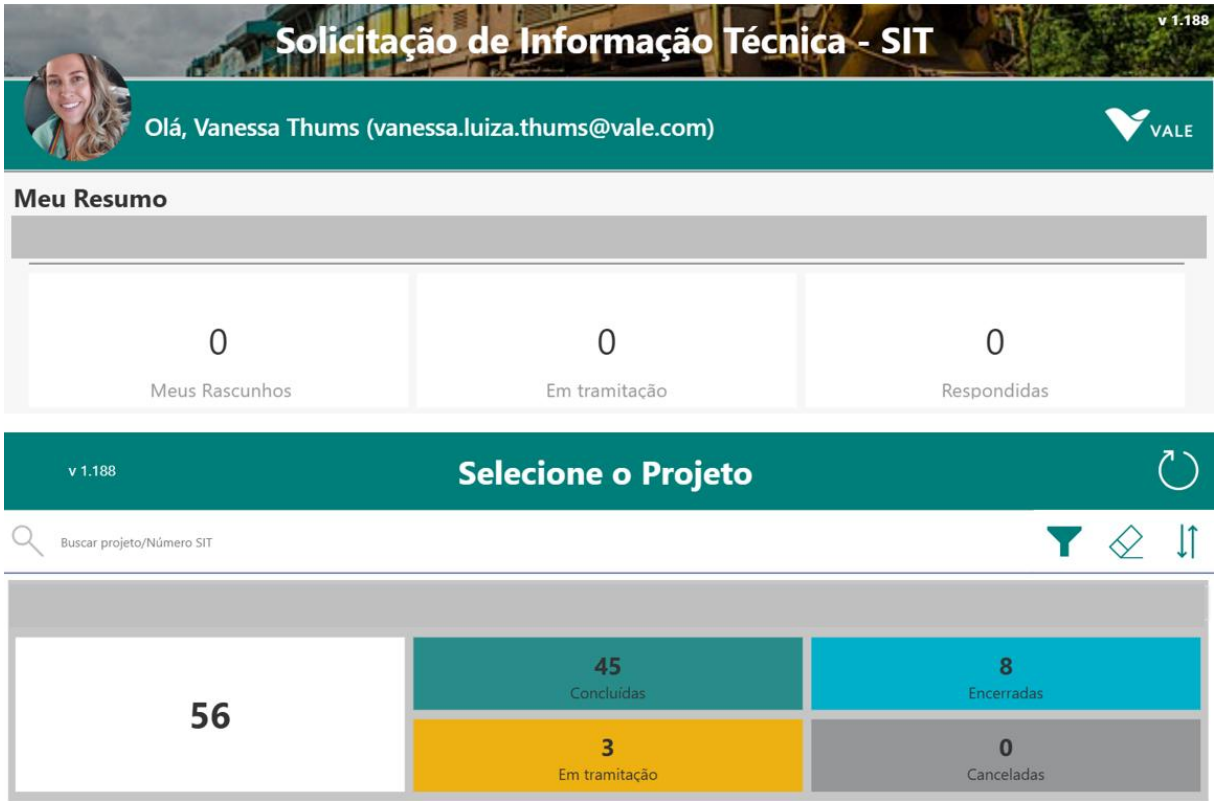


Figura 2: Sistema de gestão interno das SITs.



Figura 3: Exemplo de etapas para conclusão de uma SIT.

2.4 Controle de qualidade do aterro compactado

Durante a execução do aterro compactado são previstas a execução de diversos ensaios para garantir o controle de compactação e tecnológico adequado. A definição dos ensaios e sua periodicidade deve ser apresentada em uma Especificação Técnica ou Relatório de Materiais e Serviços de Construção. A execução do aterro prevê minimamente as etapas de lançamento do material, espalhamento na área da praça de trabalho (Figura 4), umidificação caso o material não esteja na umidade ótima de projeto (Figura 5), compactação (Figura 6) e escarificação e gradeamento para aderência com a próxima camada (Figura 7). A equipe de topografia deve acompanhar todas as essas etapas construtivas, para medição de altura da camada antes e após a compactação e locação dos pontos de coleta de amostras para os ensaios.



Figura 4: Etapa de espalhamento do material na faixa de trabalho.



Figura 5: Etapa de umidificação para chegar na umidade ótima de projeto.



Figura 6: Etapa de compactação do material.



Figura 7: Etapa de escarificação para aderência da camada seguinte.

Como controle executivo para conferência da aderência das atividades executadas em campo com os parâmetros de projeto, o grau de compactação e o teor de umidade das camadas compactadas, deverá ser verificado rotineiramente, de acordo com o especificado em projeto, com a execução de ensaios *hilf* e *proctor-hilf* para cada 500m³ de material aplicado no maciço da barragem. Apesar do volume utilizado como referência para a execução dos ensaios, toda camada compactada deverá ser ensaiada, assim como em:

- nas junções entre zonas compactadas por sapo e rolo, junto às ombreiras e a quaisquer elementos rígidos construídos no interior dos maciços compactados;
- nas áreas junto a instrumentos de auscultação e nas áreas onde os rolos fizerem manobras e/ou diminuírem sua velocidade durante as operações de compactação.

Estes ensaios são realizados pela equipe de laboratório da construtora. De forma a ter maior garantia dos resultados foi estabelecido um *cross-check* por uma empresa contratada pela equipe de Implantação das obras, e assim, o fluxo da Figura 8 deve ser seguido para liberação das camadas. Auditorias internas e externas são realizadas periodicamente nos dois laboratórios de forma a certificar que ambos seguem os normativos para execução dos ensaios e se há alguma não conformidade no processo executivo.

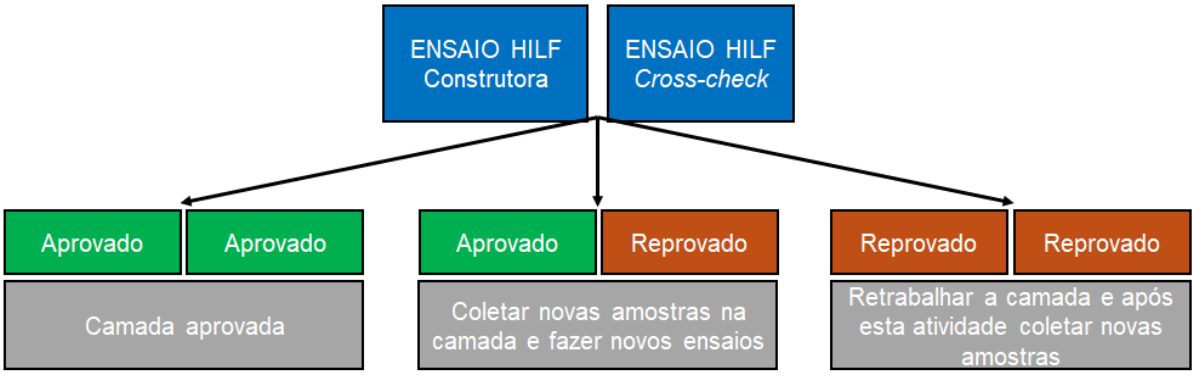
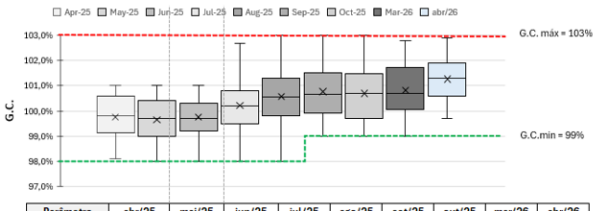
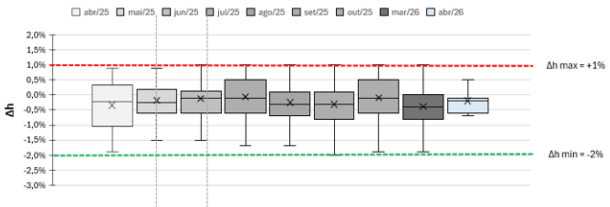


Figura 8: Fluxo de aprovação da camada pelos ensaios *hilf.*

As empresas que executam os ensaios de laboratório (construtora e *cross-check*) devem atuar de forma independente de forma a garantir uma análise individual e maior consistência das informações. Os resultados são avaliados pela equipe da Qualidade para certificar que não há erros de cálculo ou de dados e, após esta análise, são compartilhados com a Projetista e o EOR para análises estatísticas e inclusão nos relatórios mensais da obra, conforme apresentado na Figura 9.



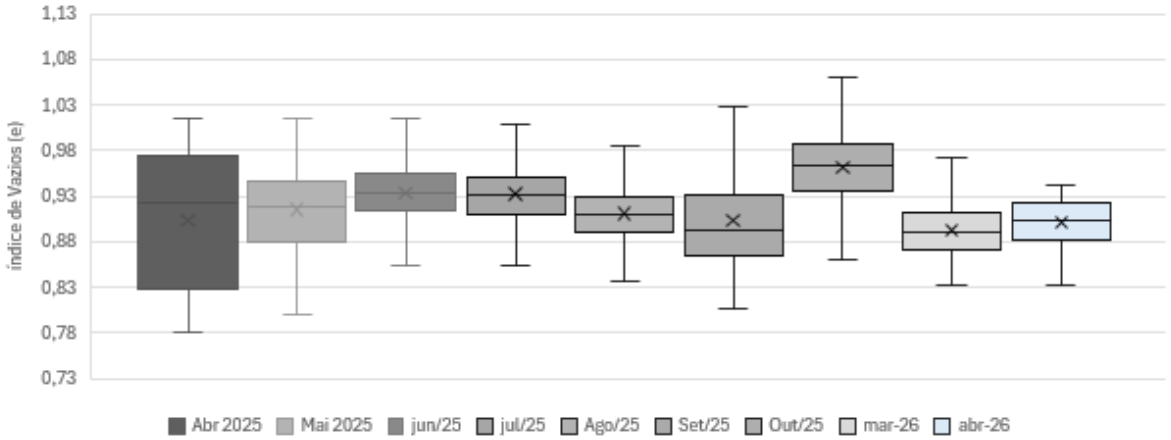
Parâmetro	abr/25	mai/25	jun/25	jul/25	ago/25	set/25	out/25	mar/26	abr/26
Máximo	101,0%	101,0%	101,0%	103,0%	103,0%	103,0%	103,0%	102,8%	102,9%
P75	100,6%	100,4%	100,3%	100,8%	101,3%	101,5%	101,5%	101,7%	101,9%
Med.	99,8%	99,7%	99,7%	100,2%	100,6%	100,7%	100,7%	100,7%	101,3%
Média	99,8%	99,6%	99,7%	100,2%	100,6%	100,8%	100,7%	100,8%	101,3%
P25	99,1%	99,0%	99,2%	99,5%	99,8%	99,9%	99,7%	100,1%	100,6%
Mínimo	98,1%	98,0%	98,0%	98,0%	98,0%	99,0%	99,0%	99,0%	99,7%
Desv. Pad	0,9%	0,9%	0,7%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	0,8%
C.V.	0,9%	0,9%	0,7%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	0,8%
n	28	167	322	481	438	566	192	66	26



Parâmetro	abr/25	mai/25	jun/25	jul/25	ago/25	set/25	out/25	mar/26	abr/26
Máximo	0,9%	0,9%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
P75	0,3%	0,2%	0,1%	0,5%	0,1%	0,1%	0,5%	0,0%	-0,1%
Med.	-0,2%	-0,3%	-0,1%	-0,1%	-0,3%	-0,3%	-0,1%	-0,4%	-0,2%
Média	-0,3%	-0,2%	-0,1%	-0,1%	-0,3%	-0,3%	-0,1%	-0,4%	-0,2%
P25	-1,1%	-0,6%	-0,6%	-0,6%	-0,7%	-0,8%	-0,6%	-0,8%	-0,6%
Mínimo	-1,9%	-1,5%	-1,8%	-1,7%	-2,0%	-2,0%	-1,9%	-1,9%	-0,7%
Desv. Pad	0,9%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,7%	0,7%	0,7%	0,5%
C.V.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
n	14	92	154	245	219	285	99	35	15

Figura 9: Grau de compactação e Desvio de Umidade (camadas aprovadas pelo ensaio de HILF).

Como boa prática, os resultados dos ensaios *hilf* são acompanhados pelos valores de índice de vazios conforme apresentado na Figura 10, considerando a massa específica dos grãos média obtida pelos ensaios de caracterização. Este critério é complementar para uma análise mais completa, não sendo critério de liberação das camadas.



Parâmetro	abr/25	mai/25	jun/25	jul/25	ago/25	set/25	out/25	mar-26	abr-26
Máximo	1,01	1,05	1,02	1,04	1,00	1,05	1,09	0,97	0,94
P75	0,97	0,95	0,95	0,95	0,93	0,93	0,99	0,91	0,92
Med.	0,92	0,92	0,93	0,93	0,91	0,89	0,97	0,89	0,90
Média	0,90	0,91	0,93	0,93	0,91	0,90	0,96	0,89	0,90
P25	0,83	0,88	0,91	0,91	0,89	0,87	0,94	0,87	0,88
Mínimo	0,78	0,80	0,85	0,54	0,82	0,81	0,83	0,83	0,83
Desv. Pad	0,08	0,05	0,03	0,04	0,03	0,05	0,04	0,03	0,03
C.V.	0,08	0,05	0,03	0,04	0,03	0,06	0,04	0,03	0,03
n	28,00	182,00	310,00	481,00	438,00	570,00	192,00	67,00	29,00

Figura 10: Índice de vazios (camadas aprovadas pelo ensaio de *hilf*).

Além dos ensaios de compactação para liberação de camada, são executados ensaios de caracterização com amostras deformadas e a coleta de blocos indeformados para a caracterização quanto à resistência ao cisalhamento do aterro compactado concomitante à obra. O objetivo desses ensaios é avaliar se o aterro está sendo construído conforme as premissas estabelecidas em projeto e vem apresentando o comportamento esperado. Caso seja visualizado algum desvio pelos resultados dos ensaios, é possível ajustar parâmetros em campo, como número de passadas do rolo compactador, melhor entendimento do material da jazida e melhor controle de praças.

- Ensaios de caracterização completa: para cada 2.000 m^3 de material colocado na barragem com execução de granulometria com sedimentação, massa específica dos grãos, umidade natural, limites de Atterberg e compactação pelo Proctor Normal.
- Coleta de blocos indeformados 30×30×30 cm: realização de ensaios especiais com execução de teor de umidade; massa específicas dos grãos; granulometria com sedimentação com e sem defloculante; limites de Consistência (LL e LP); compactação Proctor Normal; adensamento Oedométrico; permeabilidade a carga variável; triaxial CID saturado e Triaxial CIU saturado.

Uma boa prática adotada em campo é a execução de trincheiras de inspeção a cada 15 dias para avaliação tátil-visual do aterro compactado, observando se há homogeneidade no material compactado, ausência de bolsões de material saturado, ausência de diferenciação entre camadas e boa compactação. A Figura 11 apresenta um exemplo de trincheira aberta em campo para a avaliação tátil-visual da equipe técnica.



Figura 11: Trincheira aberta no aterro compactado para avaliação tátil-visual.

Todas as atividades das obras são acompanhadas pela fiscalização de campo, pelo ATO da projetista e pelo ATO independente do EOR. Caso sejam verificadas situações não aderentes às especificadas no projeto, esses profissionais possuem

autonomia para registrar uma “não-conformidade” que deve ser avaliada pela equipe de Qualidade e de Implantação com um plano de ação associado.

Por fim, a Ficha de Verificação de Serviço (FVS) é preenchida em campo para registro padronizado das etapas construtivas, sendo posteriormente avaliada e aprovada pelo ATO, topografia e fiscais de campo. Este documento é em formato de checklist e apresenta todas as informações relacionadas à camada aprovada permitindo que os dados sejam rastreáveis e auditados.

2.5 Gestão das etapas construtivas

A execução de uma obra de grande porte como a construção de uma barragem necessita de uma equipe robusta e multidisciplinar que deve atuar no estudo do projeto, na análise do método construtivo, nas etapas executivas, produtividade, orçamento, frentes de atividades.

Uma iniciativa de gestão foi aplicada na obra de forma a otimizar e automatizar a geração de informações do campo e, viabilizar a identificação de gargalos nas etapas construtivas. Esta iniciativa é a utilização de um *software* de Gerenciamento de Recursos Móveis (GRM) que possui o cadastro de todos os equipamentos mobilizados para as obras (Figura 12) possibilitando o acompanhamento em tempo real as atividades no campo (Figura 13). Importante mencionar que alguns dos equipamentos mobilizados na obra são elétricos visando menor produção de gases poluentes.

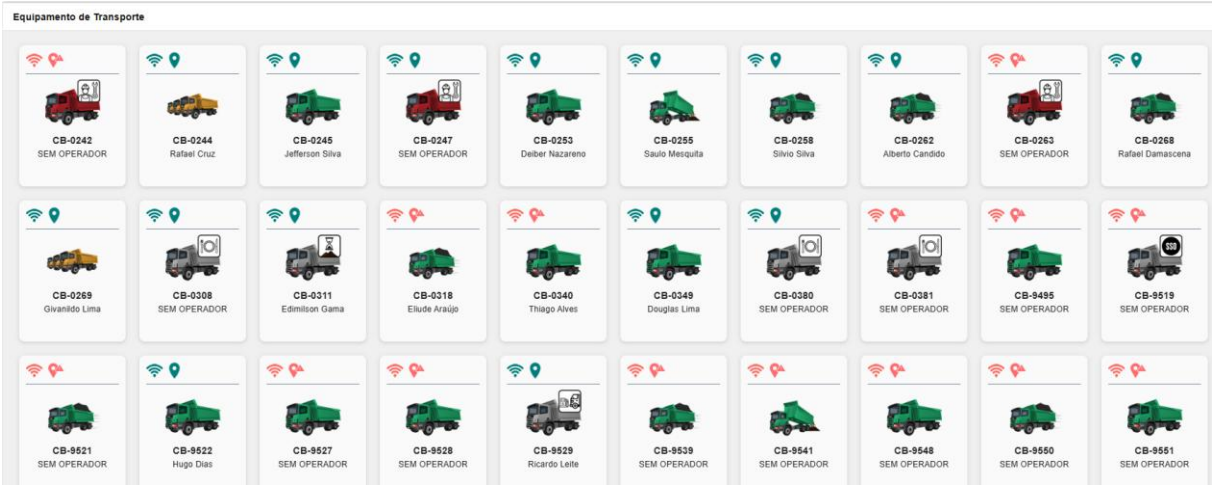


Figura 12: Equipamentos cadastrados para as obras.

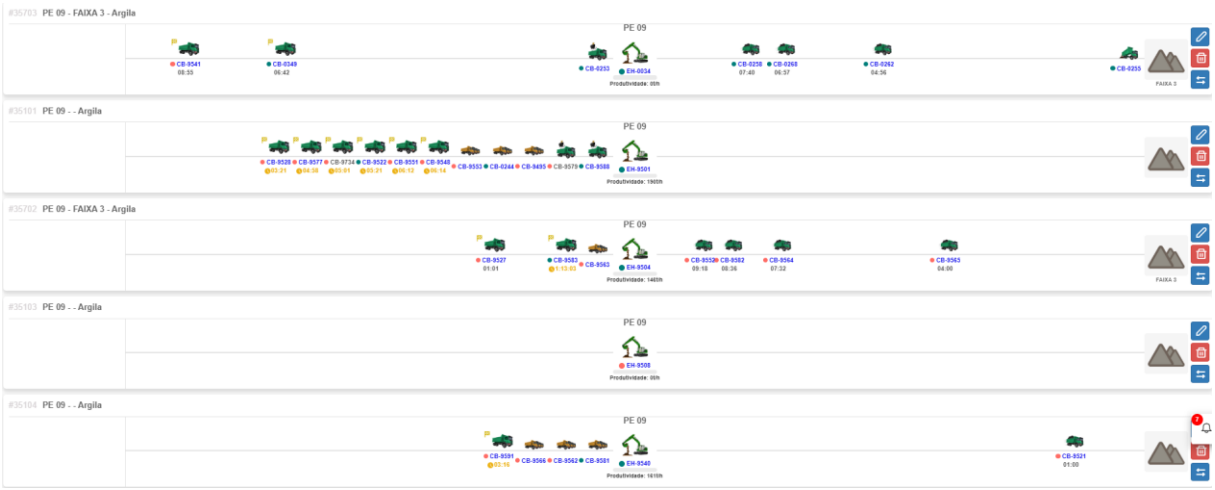


Figura 13: Ciclos dos equipamentos na execução do aterro e na jazida do material.

Outra forma de visualizar a atuação dos equipamentos é na praça de trabalho que é dividida por faixas para melhor gestão das etapas construtivas e dos ensaios executados, como é possível visualizar nas Figura 14 e Figura 15. Os fiscais de campo devem atualizar as atividades de levantamento topográfico e execução dos ensaios de compactação via aplicativo para que o sistema esteja em tempo real.

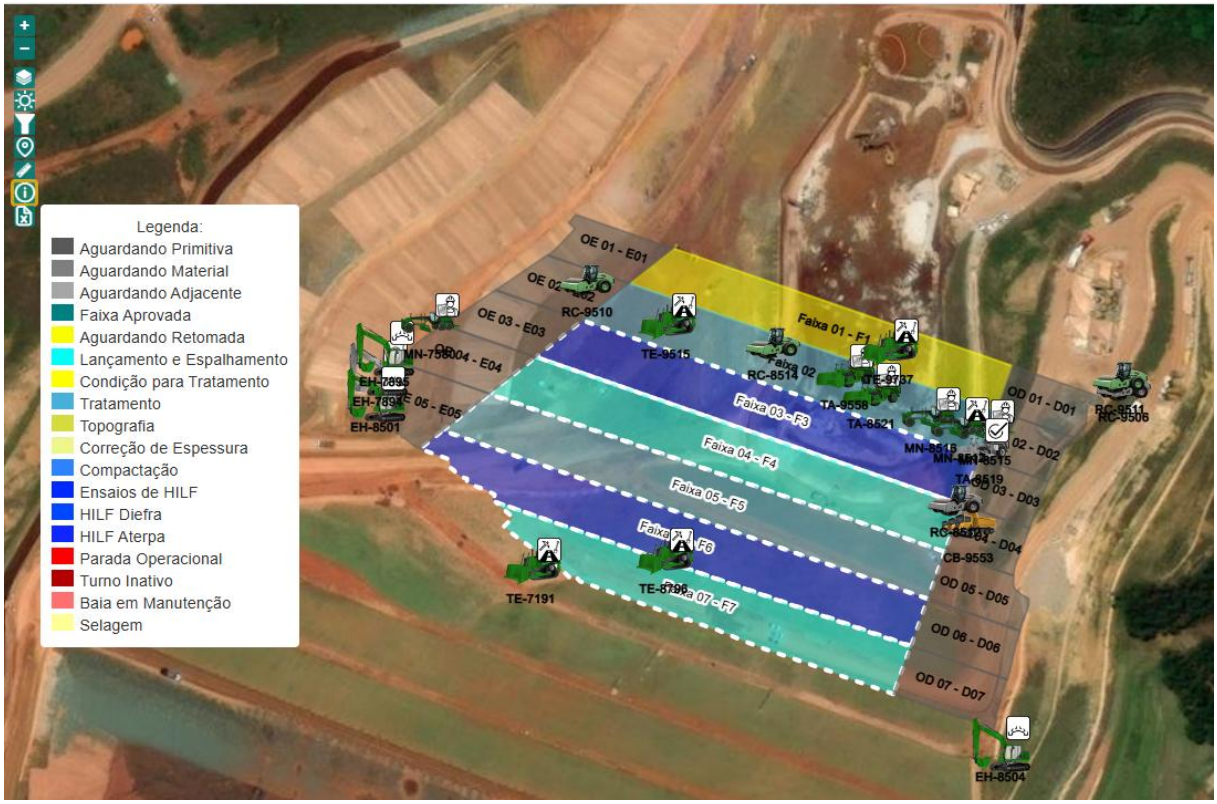


Figura 14: Visão geral das praças de trabalho com visibilidade dos equipamentos atuando e da etapa construtiva pelo sistema de gestão.



Figura 15: Divisão das faixas na praça de trabalho para manutenção da organização em campo.

O sistema apresenta a evolução de cada faixa, sendo possível visualizar o tempo gasto para a conclusão de cada etapa até a aprovação após os resultados positivos dos ensaios de compactação, como é possível visualizar na Figura 16, Figura 17 e Figura 18. Esta gestão em tempo real permite a identificação de gargalos e avaliações estatísticas da produtividade e se as atividades programadas foram executadas conforme planejado. Como as obras ocorrem durante horário administrativo, quando há encerramento do turno sem completar as etapas da faixa, é sinalizado o “turno inativo” para não contabilizar o tempo parado.

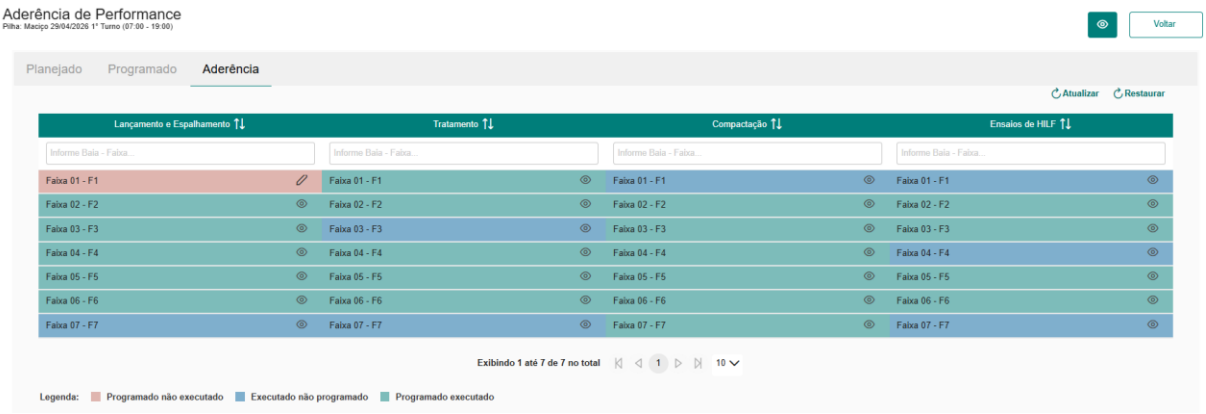


Figura 16: Visualização da aderência das etapas construtivas das faixas da praça de trabalho.

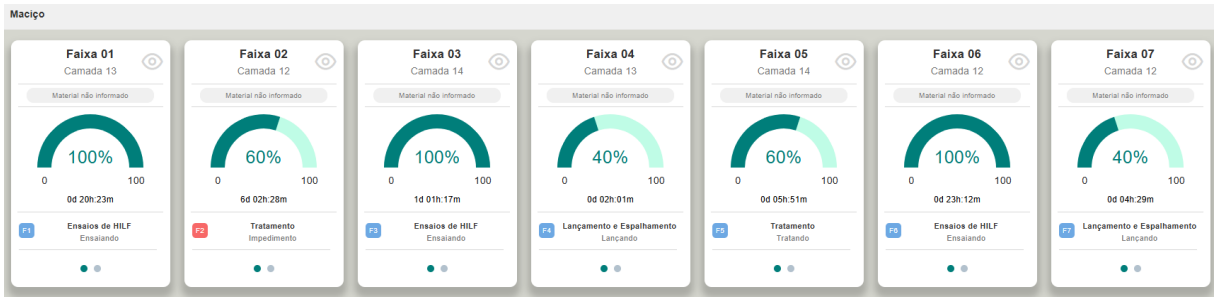


Figura 17: Evolução de cada faixa da praça de trabalho.

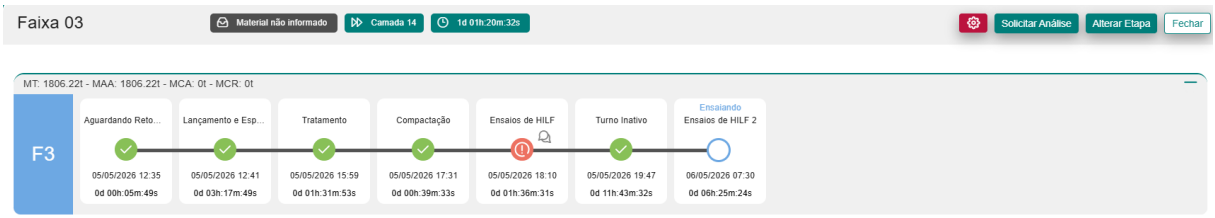


Figura 18: Visualização micro das etapas construtivas.

Por fim, é possível visualizar os principais parâmetros de acompanhamento das obras na página principal do sistema, com a apresentação da aderência de performance, apresentando o programado e executado por dia, facilitando a visualização de dados e apresentação de informações para a liderança (Figura 19).

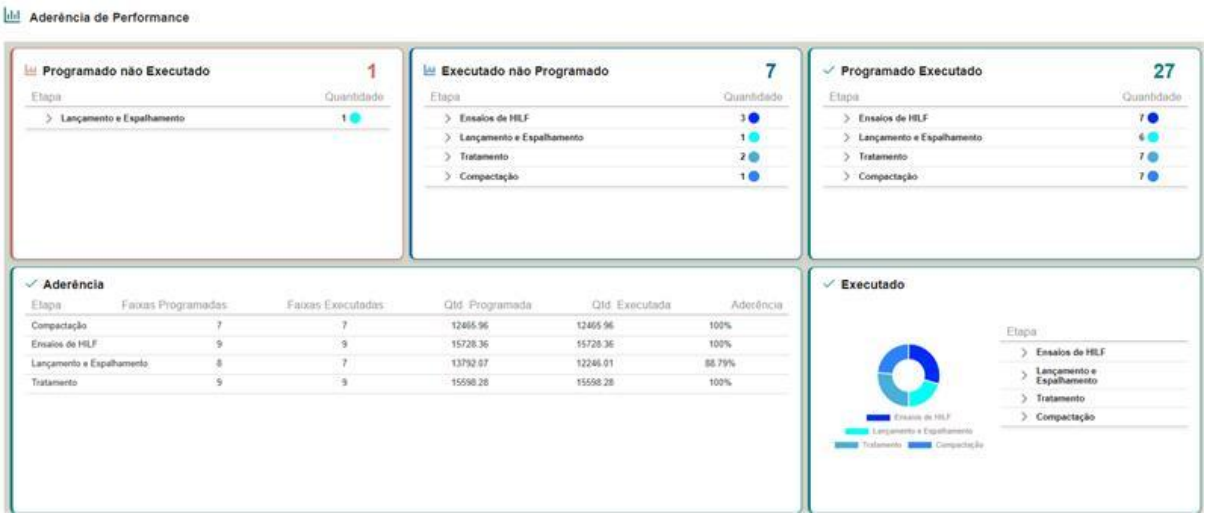


Figura 19: Painel resumido de performance das obras.

2.6 Instrumentação e monitoramento

O Projeto Detalhado da construção do aterro compactado da estrutura elaborou um plano de instrumentação com instrumentos a serem instalados antes, durante e após a conclusão das obras. Os instrumentos têm como objetivo viabilizar o monitoramento de poropressões e deslocamentos e comparar com os efeitos previstos no projeto. O estudo prevê a instalação de piezômetros Casagrande, piezômetros elétricos, medidores de nível d'água, células de pressão, inclinômetros, placas de recalque e marcos topográficos. Alguns instrumentos são instalados em grupos, ou seja, todos os tipos de monitoramento em um mesmo ponto para melhor análise dos resultados e, nas regiões que o modelo tensão deformação indicou geração de maior poropressão, há instalação de piezômetros elétricos, células de pressão e placa de recalque em subníveis para melhor monitoramento durante a execução do aterro.

De forma a mitigar as interferências durante a execução do aterro compactado, os instrumentos que necessitam de furo de sondagem para serem instalados, são programados para a parada construtiva (período de chuva), enquanto os instrumentos elétricos são instalados pela construtora conforme cota de instalação prevista no projeto.

Como boa prática, os instrumentos já instalados durante as obras são lidos com uma frequência mínima semanal por um técnico da construtora e são acompanhados pela equipe projetista e pelo EOR da estrutura. De forma a identificar leituras anômalas foi elaborado um documento com os níveis de controle para a condição construtiva, em que foram estabelecidos níveis máximos de poropressão ou deslocamento. Os principais envolvidos nas atividades das obras e de monitoramento foram treinados quanto aos níveis de controle e, caso alguma leitura seja superior a este limite, a região deverá ser inspecionada e, se for necessário, as atividades paralisadas.

2.7 Acompanhamento das obras pela equipe técnica

Além dos ATOs que são os representantes técnicos para acompanhar a execução da obra em campo, semanalmente são realizadas reuniões presenciais denominadas "Rodada Técnica" em que são convidados para participar todos os representantes do organograma da Figura 1. Esta programação tem como objetivo fazer uma inspeção em campo com todas as áreas responsáveis presente, com visualização das atividades desenvolvidas na última semana, avaliação de desvios do projeto, discussão de pontos de dúvidas e esclarecimentos quanto à continuidade ou alterações pontuais. Após a inspeção de campo, todos os envolvidos participam de uma reunião técnica em que são reportadas ações com seus respectivos responsáveis e compartilhado informativos, ambos registrados em uma ata de reunião. Em complemento, são apresentados os resultados dos ensaios de controle de compactação executados na última semana com o objetivo de análise o comportamento do material e o índice de retrabalhos pela construtora.

Caso haja pontos de discussões mais críticas ou que envolvem decisões importantes para o andamento das obras, fóruns técnicos são agendados pontualmente com a presença de consultores e especialistas para auxiliar na solução do problema.

2.8 Atuações no planejamento da obra

Conforme descrito por MATTOS [3] no livro Planejamento e controle de obras, é necessário identificar não conformidades e situações não favoráveis a tempo de adaptar e adotar medidas preventivas e corretivas a tempo antes que seja irreversível. Ele apresenta um gráfico que compara a oportunidade construtiva com a oportunidade destrutiva, de acordo com o tempo de obra conforme apresentado na Figura 20. Quanto mais cedo as intervenções forem executadas há a oportunidade de minimizar os impactos em prazo e custo e, caso as providências são sejam tomadas dentro de um prazo aceitável, por falta de planejamento e controle, podem ser inexequíveis.

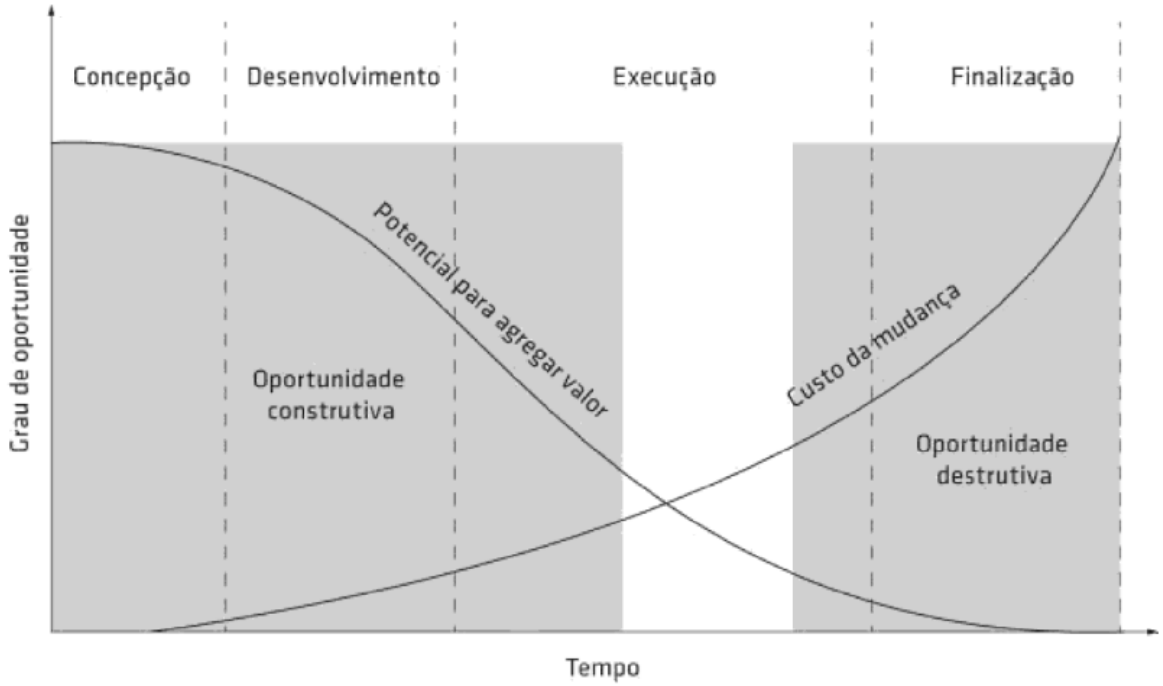


Figura 20: Grau de oportunidade da mudança em função do tempo. MATTOS [3].

Com base neste conhecimento e, tendo em vista que a obra ocorre somente no período de seca (entre meses de abril e outubro), como oportunidade e boa prática foi implementado um fórum chamado de “Lições Aprendidas” nas paradas construtivas. Todas as áreas envolvidas participam deste fórum e, mapeiam os pontos de fragilidade e os pontos a melhorar na retomada das obras. Este fórum auxilia na identificação de problemas, na otimização de recursos e na avaliação da percepção de cada área. As ações mapeadas nesta reunião geram planos de ação com responsáveis associados e prazos de atendimento visando a mitigação de falhas e erros no próximo ciclo de atividades.

3. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo apresentar as boas práticas adotadas na construção de um aterro compactado de uma barragem que está em processo de alteamento. As obras ocorrem somente durante o período de estiagem (abril a outubro), em dias úteis e durante horário administrativo estendido (7 as 19hrs).

O controle de qualidade na construção de um aterro compactado de barragem envolve um conjunto de procedimentos sistemáticos que asseguram a conformidade da obra com o projeto executivo e com as normas técnicas aplicáveis. Esse processo é multidisciplinar e integra verificações de campo, ensaios laboratoriais, auditorias internas, reuniões técnicas e uso de tecnologias modernas para monitoramento e rastreabilidade. Os requerimentos do GISTM associados a atividade devem ser atendidos, além de legislações de órgãos externos e procedimentos normativos internos da empresa.

Dessa forma, foram apresentados os controles de gestão, planejamento, produtividade e, principalmente qualidade dos resultados utilizados na obra em questão deste estudo. As iniciativas iniciam desde a aderência aos atendimentos às

legislações e normativos relacionados, a estruturação do organograma das áreas responsáveis pela obra, seguindo com a apresentação do controle de alterações do projeto e de qualidade do aterro compactado. De forma complementar, a gestão das etapas construtivas viabiliza um acompanhamento mais minucioso das etapas construtivas em conjunto com o acompanhamento das obras pela equipe técnica e atuações no planejamento da obra. Por fim, a instrumentação e monitoramento de instrumentos durante a execução das obras viabiliza a análise das poropressões e deslocamentos gerados pela obra em comparação com o previsto em projeto.

Em síntese, a adoção de práticas estruturadas de gestão, planejamento e controle de qualidade na construção do aterro compactado da barragem em alteamento demonstra o compromisso da equipe técnica com a segurança, a conformidade normativa e a eficiência operacional. O alinhamento entre legislação, normas internas e requisitos internacionais, aliado ao uso de tecnologias de monitoramento e à atuação multidisciplinar, garante não apenas a integridade da obra, mas também a confiabilidade dos resultados obtidos. Dessa forma, este estudo de caso evidencia que a integração entre rigor técnico e gestão eficiente é fundamental para assegurar a sustentabilidade e a segurança das estruturas de barragens.

4. PALAVRAS-CHAVE

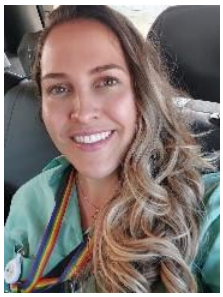
Controle, qualidade, obras, barragem, processos

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ICMM (2020) – “Global Industry Standard on Tailings Management’, Global Tailings Review, Canadá.

[2] ANM (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (2022) – “Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.” Brasília, DF, Brasil.

[3] MATTOS, A. D. (2019) – “Planejamento e controle de obras”, 2ª ed. São Paulo, Oficina de textos.

	**Vanessa Luiza THUMS** Engenheira Geotécnica na Vale. Possui Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais e Especialização em Barragens pela PUCMG. Possui experiência na gestão de estruturas geotécnicas e em projetos de barragens de mineração com ênfase em interpretação de ensaios de campo e laboratório e interpretação de instrumentação geotécnica.
	**Tadeu Marçal MIRANDA** Gerente Técnico de Gestão de Rejeitos (RTFE) na Vale, formado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto, Especialização em Gestão de Projetos e Mestrado em Geotecnia pela UFOP. Experiência em projetos geotécnicos voltados para pilhas de estéril e barragens, descaracterização de barragens e acompanhamento de performance e construção de estruturas geotécnicas.
	**Marcus Vinicius Alves POLAZZI** Engenheiro Especialista em implantação de projetos na Vale, formado em Engenharia civil na Escola de Engenharia Kennedy. Especialização em Gestão de Projetos Ibmec. Experiência implantação de projetos geotécnicos como pilhas de estéril e rejeito, barragens, obras de artes (OAE), obras industriais, acompanhamento técnico e performance dos projetos.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.2
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

Controle Tecnológico e Governança na Disposição de Resíduo de Bauxita Filtrado em Pilha com Operação Assistida

Amanda DAMASCENO
Engenheira Geotécnica - Alunorte

Rodrigo MONTEIRO
Engenheiro de Planejamento e Controle - Alunorte

Aidan NERI
Engenheiro de Projetos - Alunorte

Ronaldo PANTOJA
Coordenador de Geotecnia - Alunorte

RESUMO

A disposição de resíduo de bauxita desaguado por filtro prensa representa uma alternativa mais segura e eficiente em comparação ao método úmido tradicional, sobretudo por possibilitar maior densidade, melhor aproveitamento de área e maior controle das condições de estabilidade geotécnica. Apesar de existirem normas aplicáveis a estruturas em pilha, como é o caso da ABNT NBR 13028:2026 - parte 3, os controles para disposição de resíduo de bauxita filtrado ainda são específicos às condições de cada estrutura, especialmente no que se refere aos controles executivos e operacionais associados ao clima.

Este trabalho apresenta a experiência na implementação de uma pilha de resíduo filtrado com operação assistida, destacando os principais controles tecnológicos e organizacionais aplicados. O controle de qualidade é baseado na verificação do grau de compactação e do desvio de umidade pelo método de Hilf, com frequência definida por volume disposto, além do monitoramento diário do teor de umidade nas pilhas de transferência. Ensaios periódicos de caracterização geotécnica, como granulometria, limites de Atterberg e compactação Proctor normal, permitem acompanhar a variabilidade do material ao longo do tempo e manter histórico técnico.

O controle topográfico diário, aliado ao escaneamento a laser semanal, assegura a aderência às premissas de projeto, ao controle de volumes e ao monitoramento da taxa de crescimento da pilha. A integração entre Engenharia, Operação Empreendedor e Operação Contratada, apoiada por ferramentas gerenciais e plano de comunicação estruturado, permite maior rastreabilidade das frentes executivas, resposta mais rápida a desvios operacionais e melhor alinhamento entre critérios de

projeto e execução em campo.

Conclui-se que a combinação de controle tecnológico sistemático e estrutura organizacional robusta reduz a variabilidade construtiva da pilha e melhora a confiabilidade do desempenho geotécnico ao longo da operação.

ABSTRACT

The disposal of filter-pressed bauxite residue represents a safer and more efficient alternative compared to the conventional wet disposal method, mainly due to its higher density, improved land use efficiency, and greater control over geotechnical stability conditions. Although there are standards applicable to stacked structures, specific criteria for the disposal of filtered bauxite residue still require further consolidation, particularly regarding the operational and construction control practices applied to these structures.

This study presents the experience gained during the implementation of a filtered residue stack operated under assisted operation, highlighting the main technological and organizational controls adopted. Quality control is based on the verification of compaction degree and moisture deviation using the Hilf method, with testing frequency defined according to the disposed volume, in addition to daily monitoring of moisture content in transfer stockpiles. Periodic geotechnical characterization tests, including grain size distribution, Atterberg limits, and Standard Proctor compaction tests, are performed to monitor material variability over time and maintain a technical database.

Daily topographic control, combined with weekly laser scanning surveys, ensures compliance with design assumptions, volume control, and monitoring of stack growth rates. The integration between Engineering, Owner's Operations, and Contractor Operations, supported by management tools and a structured communication plan, enables better traceability of construction fronts, faster response to operational deviations, and improved alignment between design criteria and field execution.

It is concluded that the combination of systematic technological control and a robust organizational structure reduces construction variability within the stack and improves the reliability of geotechnical performance throughout operation.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por bens industriais e de consumo impulsionou o crescimento das atividades de mineração e beneficiamento mineral. Como consequência, houve também aumento significativo na geração de resíduos, tornando sua disposição uma preocupação crescente para mineradoras e indústrias de beneficiamento, que vêm buscando alternativas mais seguras, estáveis e ambientalmente adequadas para disposição desses materiais.

No caso da bauxita, utilizada na produção de alumina por meio do processo Bayer, são gerados resíduos com características relacionadas ao minério de origem. No Brasil, a técnica mais utilizada ainda é a disposição via úmida, na qual o resíduo é transportado na forma de polpa, com elevado teor de umidade, para áreas de armazenamento. Esse método resulta em depósitos com baixa densidade e estruturas cada vez maiores, aumentando a complexidade geotécnica e os impactos associados à disposição [7]. Nesse contexto, a disposição em pilhas surge como uma alternativa mais eficiente para armazenamento do resíduo desaguado por filtro prensa .

Apesar da existência de referências aplicáveis à disposição de rejeitos e resíduos em pilhas, critérios específicos devem ser definidos em função do tipo e características do resíduo empilhado, principalmente no que se refere aos controles executivos e operacionais. Dessa forma, torna-se necessária a adoção de controles rigorosos de execução, capazes de assegurar a qualidade construtiva, a estabilidade e a redução de retrabalhos durante a implantação das pilhas. Em regiões de clima tropical e subtropical, essa necessidade se torna ainda mais relevante devido às dificuldades operacionais impostas pelo período chuvoso, como ocorre durante o inverno amazônico.

O processo de desaguamento em filtros prensa permite que o resíduo de bauxita atinja teores de sólidos da ordem de 78%, possibilitando a aplicação de técnicas de terraplanagem, como disposição em camadas controladas e compactação. Entre as principais vantagens desse método destacam-se o menor consumo de área, a possibilidade de empilhamento com inclinações mais elevadas e o aumento da eficiência no aproveitamento do espaço disponível.

Embora o material apresente elevada densidade ao sair das câmaras do filtro prensa, durante a descarga e espalhamento ocorre sua fragmentação em blocos menores, formando um material mais solto e com redução de densidade. Dessa forma, a compactação torna-se uma etapa fundamental para garantir melhores condições de disposição e maior segurança da estrutura, promovendo aumento da resistência, redução da compressibilidade e diminuição da permeabilidade do material [6].

2. CONTROLES E BOAS PRÁTICAS

O projeto do aterro compactado considerou a implantação de uma pilha de resíduo em área destinada à disposição de material desaguado por filtro prensa. A operação da estrutura teve início durante a fase de comissionamento, em 2017, em uma refinaria de alumina localizada no estado do Pará. As premissas operacionais da estrutura são estabelecidas em Manual de Operação, Vigilância e Manutenção, contemplando as etapas descritas a seguir:

a. Controle de Qualidade da construção e Estrutura de Suporte

b. Controle das Características do Resíduo nas Pilhas de Transferência

c. Controle Topográfico

d. Controle hidráulico

e. Controles Ambientais

f. Monitoramento Geotécnico

2.1 Controle de Qualidade da construção e Estrutura de Suporte

O controle de qualidade da construção é realizado com base em dois parâmetros principais: grau de compactação e desvio de umidade (Figura 4), determinados pelo método de [4]. Os ensaios são executados a cada 800 m³ de resíduo disposto. A compactação é realizada com rolos tipo pé de carneiro e rolos lisos, utilizados na selagem superficial, sendo o número de passadas ajustado conforme o desempenho obtido em campo e os critérios previamente estabelecidos.

Os parâmetros de controle foram definidos a partir de aterros experimentais executados durante a fase de projeto e são reavaliados periodicamente ao longo da operação. Quando os resultados obtidos não atendem aos limites estabelecidos, a camada é submetida à correção ou recompactação antes da continuidade da disposição.

Semanalmente, os pontos ensaiados são plotados em planta juntamente com o avanço da pilha, permitindo verificar o atendimento aos critérios de controle de qualidade, conforme apresentado nas Figuras 1 e 2. Os resultados também são cadastrados topograficamente, organizados em planilhas e consolidados em histogramas para acompanhamento histórico dos parâmetros de controle, conforme ilustrado nas Figuras 3 e 4.

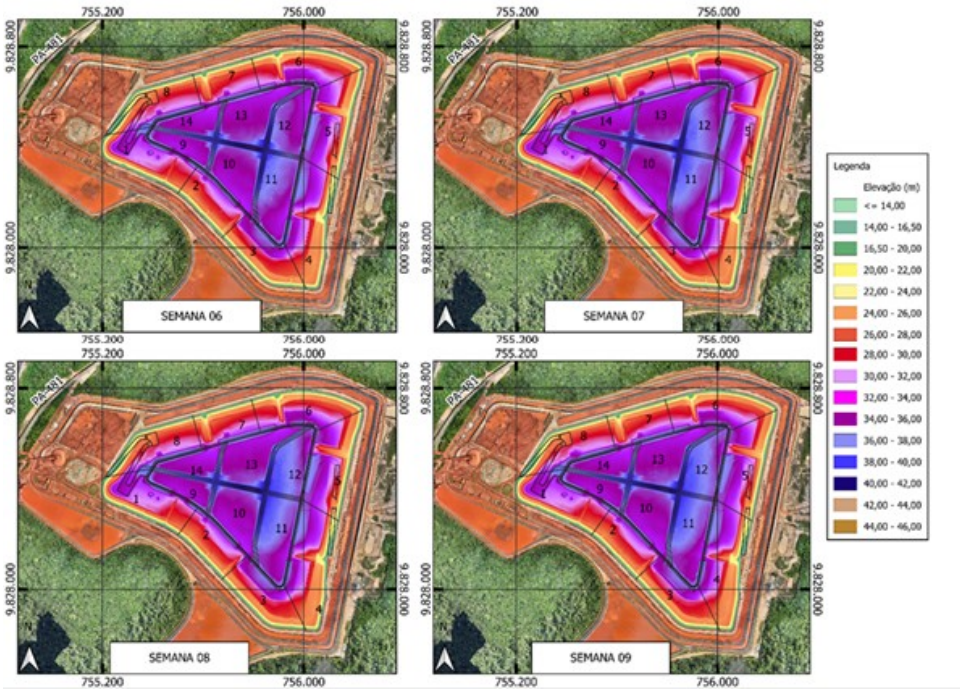


Figura 2 - Avanço da disposição na Pilha

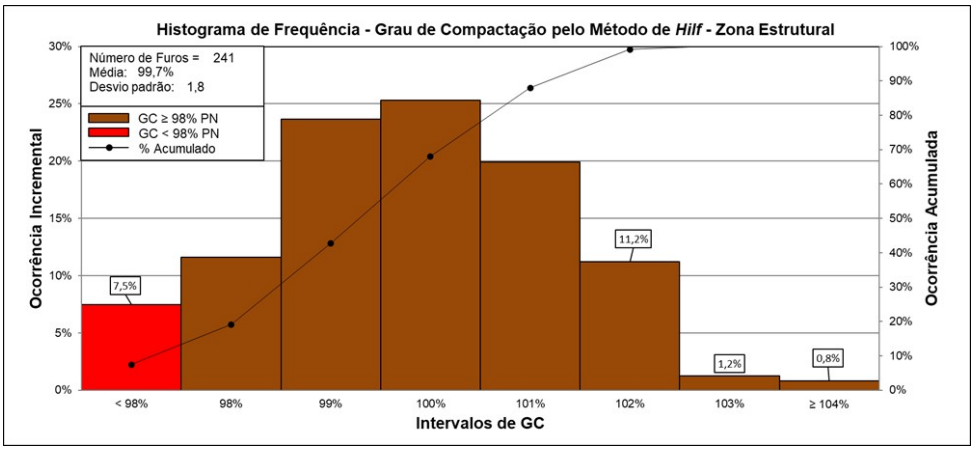


Figura 3 –Histograma de Frequência - Grau de Compactação pelo Método de Hilf

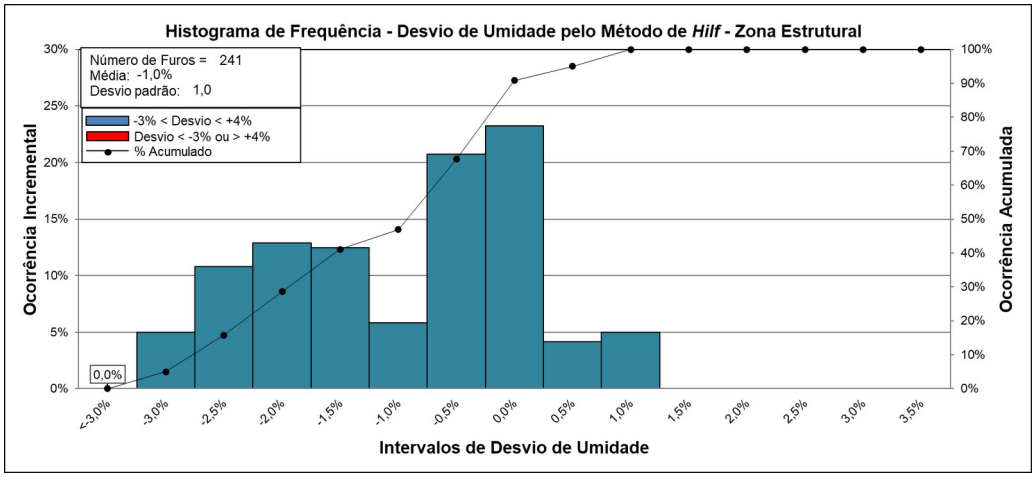


Figura 4 – Histograma de Frequência - Grau de Compactação pelo Método de Hilf (Pimenta de Ávila Consultoria, 2026)

2.2 Controle das Características do Resíduo na Pilha

2.2.1 Umidade e Teor de Sólidos do Resíduo

No processo de beneficiamento da bauxita, o resíduo é transportado por correrias tubulares até pontos de transferência onde o resíduo é empilhado, a partir dos quais o resíduo e retomado por meio de pás-carregadeiras e caminhões basculantes. Por dia são realizados 12 ensaios de determinação do teor de umidade nas pilhas de transferência com o objetivo de monitorar o atendimento às especificações. Esses ensaios são realizados em analisadores de umidade para obtenção rápida de resultados e confirmados posteriormente na estufa. Esses resultados orientam a Operação Empreendedor quanto a necessidade ou não de correção de umidade do material em campo. Os resultados são planilhados para manutenção de histórico e planejamento de ações estratégicas, conforme se verifica na Figura 5.

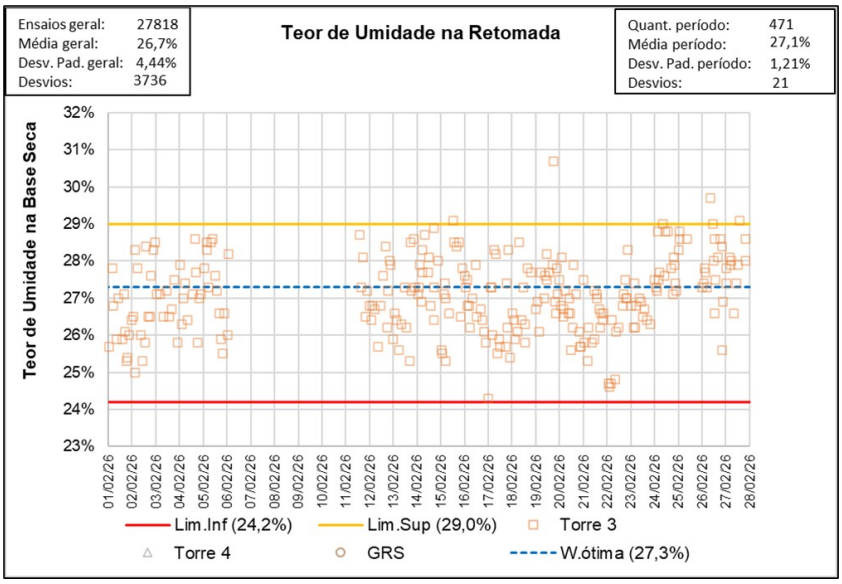


Figura 5 – Teor de Umidade na retomada (Pimenta de Ávila Consultoria, 2026)

2.2.2 Ensaios de Caracterização Geotécnica

Na Tabela 1 verificam-se os ensaios realizados, semanalmente, para caracterização completa do resíduo com a finalidade de monitorar a sua variabilidade ao longo do tempo e manutenção de histórico (Figuras 6 a 9).

Tabela 1 - Tipos de Ensaios e Normas relacionadas ao controle de Qualidade

Ensaio	Norma ABNT vigente
Determinação do teor de umidade	ABNT NBR 6457:2016
Determinação da massa específica dos grãos	ABNT NBR 6458:2016 (Versão Corrigida 2:2017)
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181:2018
Determinação do limite de liquidez	ABNT NBR 6459:2016 (Versão Corrigida:2017)
Determinação do limite de plasticidade	ABNT NBR 7180:2016
Ensaio de compactação (Proctor Normal)	ABNT NBR 7182:2020

Durante o período de referência foram disponibilizados ensaios de granulometria completa (peneiramento e sedimentação), limites de Atterberg e de compactação na energia Proctor normal. A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados até fevereiro/2026.

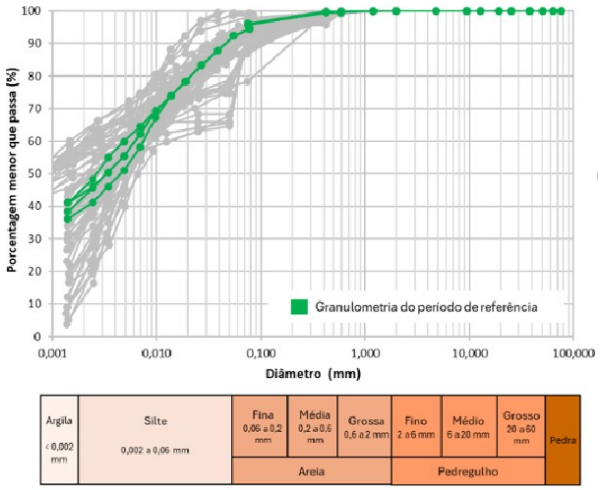


Figura 6 – Curva granulométrica dos ensaios por peneiramento e sedimentação, de acordo com a classificação proposta pela ABNT

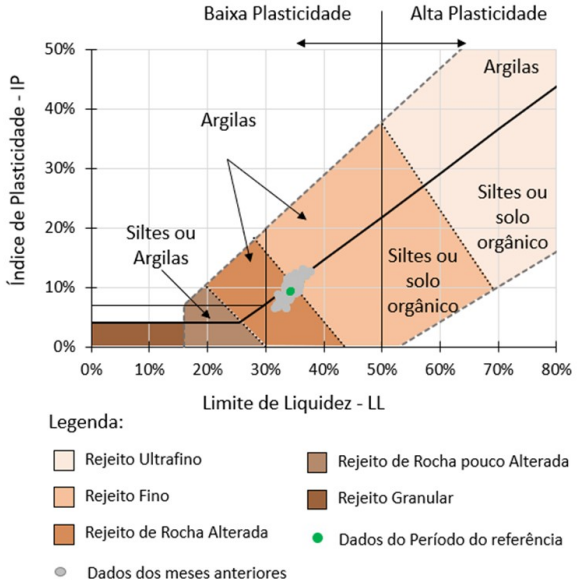


Figura 7 - Carta de plasticidade de acordo com proposta do ICOLD (2017) – Período de Referência setembro/2021 a fevereiro/2026

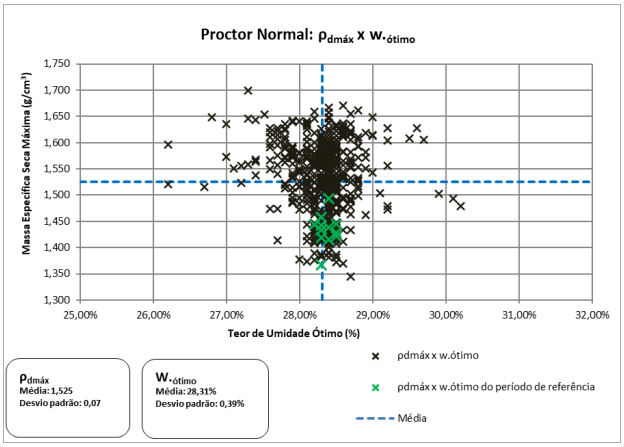


Figura 8 – Ensaios Proctor Normal – Massa específica aparente seca máxima versus umidade ótima – Dados de outubro/2019 a fevereiro/2026 (Pimenta de Ávila Consultoria, 2026)

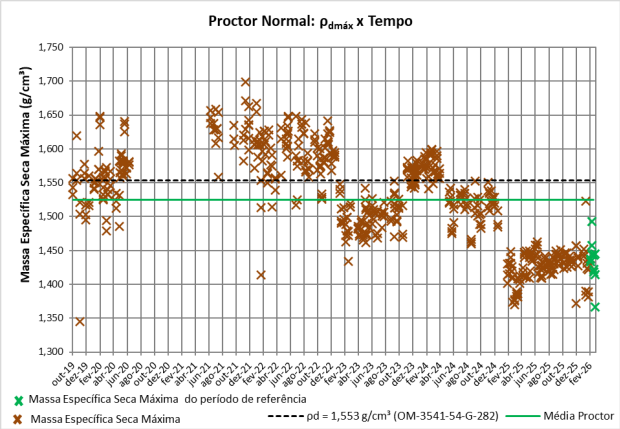


Figura 9 – Massa específica aparente seca máxima ao longo do tempo – Dados de outubro/2019 a fevereiro/2026 (Pimenta de Ávila Consultoria, 2026)

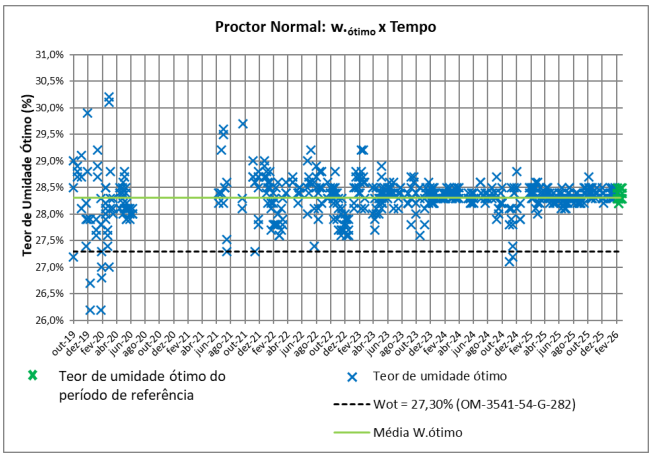


Figura 1 – Umidade ótima ao longo do tempo – Dados de outubro/2019 a fevereiro/2026 (Pimenta de Ávila Consultoria, 2026)

2.2.3 Controle Topográfico

O controle topográfico da formação da pilha é realizado diariamente por meio de levantamentos convencionais e, semanalmente, com escaneamento a laser. Os levantamentos topográficos convencionais têm como objetivo verificar a aderência da construção às premissas de projeto, especialmente em relação aos sistemas de drenagem, espessura das camadas executadas e inclinação dos taludes. Já o escaneamento a laser é utilizado principalmente para acompanhamento da curva de enchimento (*filling curve*) da estrutura.

A equipe responsável pela operação da disposição conta com suporte topográfico dedicado, supervisionado pela equipe técnica do empreendedor, permitindo direcionar as atividades quanto às áreas de lançamento e às cotas previstas para cada etapa de alteamento da pilha.

A Figura 11 apresenta, de forma esquemática, o avanço semanal da disposição, destacando as regiões com lançamento de material ao longo do período analisado. Essas informações auxiliam no acompanhamento operacional da disposição e na verificação dos volumes executados.

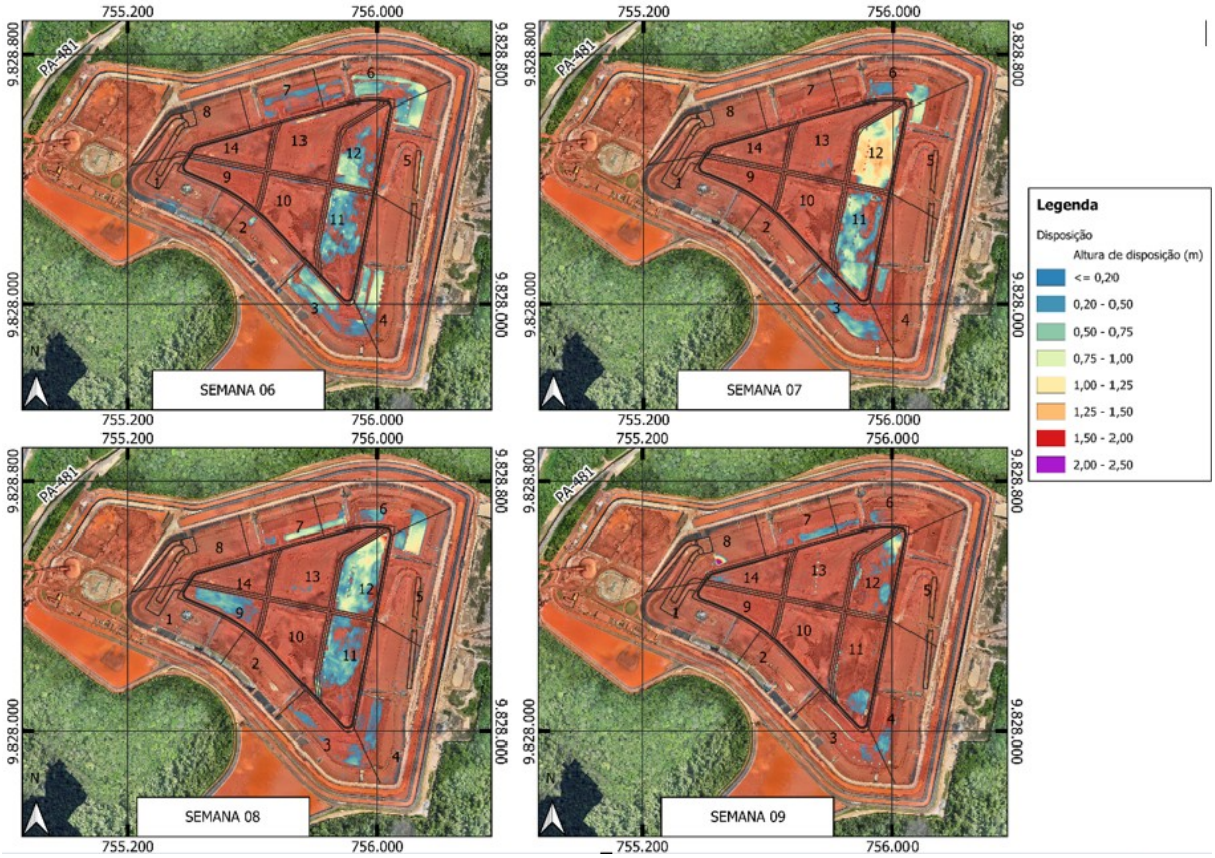


Figura 11 - Planta para mostrar o avanço da subida da pilha (Pimenta de Ávila Consultoria, 2026)

3. ESTRUTURA ORGANIZACIONAL

Além dos controles de parâmetros, uma robusta estrutura organizacional garante a continuidade operacional do depósito. Basicamente, esta estrutura pode ser dividida em três esferas, de igual importância, como se verifica abaixo:

- **Engenharia Empreendedor:** responsável pelo planejamento estratégico de alteamento da pilha, elaboração e detalhamento de projetos e elaboração do Plano Diretor. Conta com uma equipe de Inspetores de Qualidade e de Operação Assistida da projetista que asseguram o cumprimento das especificações técnicas de projeto. Além disso, conforme indicado pelo GISTM, mantém diálogo com o Engenheiro de Registros (EoR);
- **Operação Empreendedor:** responsável pelo planejamento tático de alteamento da pilha, monitoramento de frota e fiscalização da contratada responsável pela disposição;
- **Operação Contratada:** responsável pelo planejamento operacional de alteamento da pilha, operação de transporte e disposição do resíduo em

conformidade com as especificações de projeto e orientações do Empreendedor.

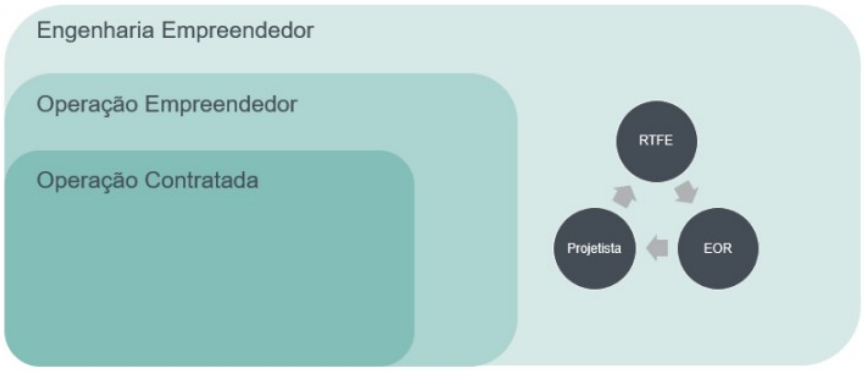


Figura 11 – Esquema da Estrutura Organizacional

Ressalta-se a importância de estabelecimento de ferramentas gerenciais que garantam uma dinâmica eficiente entre essas esferas. Neste contexto, destaca-se a Matriz RACI associada a um Plano de Comunicação. Ainda, recomenda-se o estabelecimento de uma ferramenta de gerenciamento de não conformidades que contenha informações básicas como descrição da não conformidade e plano de ação (corretiva e preventiva). Esta prática garante que as não conformidades sejam tratadas, evita que se repitam e mantém um histórico que pode ser consultado em auditorias. Além disso, esse tópico também se alinha aos princípios estabelecidos pelo *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM), desenvolvido pelo International Council on Mining and Metals (ICMM), Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e Principles for Responsible Investment (PRI). O GISTM reforça a necessidade de integração entre projeto, operação, monitoramento, gestão de riscos e governança ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos e resíduos. Nesse contexto, práticas como monitoramento contínuo, gestão de águas, definição clara de responsabilidades técnicas, avaliação permanente de riscos e implementação de medidas preventivas constituem elementos fundamentais para garantir a segurança e o desempenho operacional de estruturas de disposição de resíduos.

4. CONCLUSÕES

Nesse artigo foram apresentados critérios específicos ser definidos em função do tipo e características do resíduo empilhado, com foco aos controles executivos e operacionais, e como ocorrem as intercorrelações entre as áreas responsáveis.

O aprendizado contínuo deve contribuir, ao longo do tempo, para calibrar os controles aplicados e fortalecer a aplicação das melhores práticas em campo.

Nesse sentido, recomenda-se a realização de avaliações quali-quantitativas dos controles existentes, com foco na resposta real da estrutura. A incorporação progressiva de critérios baseados em desempenho (performance-based) pode

complementar as diretrizes já estabelecidas em norma, permitindo maior adaptabilidade e efetividade na gestão segura dessas operações.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2018) – "ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica", Rio de Janeiro.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017) – "ABNT NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez", Rio de Janeiro.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2016) – "ABNT NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade", Rio de Janeiro.

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2020) – "ABNT NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação – Método de ensaio", Rio de Janeiro.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2025) – "ABNT NBR 13028: Mineração – Projeto e operação de disposição de rejeitos filtrados e estéril em pilha – Requisitos", Rio de Janeiro.

[6] NERY, K. D. (2013) – "Caracterização geotécnica e avaliação da compactação de um resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

[7] NEVES, M. C. A. (2017) – "Caracterização geotécnica e avaliação do comportamento de um resíduo filtrado da produção de alumina (lama vermelha) estocado na forma de aterro densificado", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

[8] INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (ICMM); UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP); PRINCIPLES FOR RESPONSIBLE INVESTMENT (PRI) (2020) – "Global Industry Standard on Tailings Management", ICMM, London, United Kingdom.

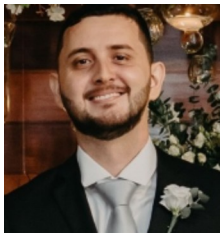
[9] Silva, P. H. A. (2020). *Simulação Numérica Das Poropressões Em Aterros Construídos Com Resíduo Da Produção De Alumina Desaguado Por Filtros Prensa*.

[10] PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA. *Relatório de Operação Assistida da Pilha de Resíduo Filtrado*. Belo Horizonte: Pimenta de Ávila Consultoria, 2026.



Amanda DAMASCENO

Engenheira Civil com experiência em geotecnia aplicada à mineração, atuando em segurança de barragens e depósitos de resíduos, estudos hidrológicos, trânsito de cheias, balanço hídrico e gestão de riscos geotécnicos. Possui atuação em análise hidrológica/hidráulica, monitoramento geotécnico, controles climatológicos e suporte técnico-operacional para estruturas de disposição de rejeitos e resíduos industriais.

	**Rodrigo MONTEIRO** Engenheiro Civil com atuação em planejamento, orçamento e controle de obras de infraestrutura e mineração. Possui experiência em gestão de projetos, geotecnia de barragens e acompanhamento operacional, com foco em integração multidisciplinar, performance e segurança operacional. Atualmente é mestrando em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental pela UFPA
	**Aidan NERI** Engenheiro Civil com atuação em supervisão de obras, fiscalização de contratos e investigações geotécnicas para projetos de mineração. Possui experiência em instrumentação geotécnica, acompanhamento de campo e gestão de serviços técnicos, com foco em segurança, qualidade e desempenho operacional. Pós-graduado em Geotecnia pela PUC Minas.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.2,
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

ESTRATÉGIA DE REAPROVEITAMENTO DE LATERITA PARA ADAPTAÇÃO DE ACESSOS OPERACIONAIS EM PILHA DE RESÍDUOS SOB CONDIÇÕES CLIMÁTICAS SAZONAIS

Pedro LIMA
Engenheiro de Manutenção Civil

Eduardo LIMA
Engenheiro de Manutenção Civil

Reginaldo ÁLVARES JR
Engenheiro de Manutenção Civil

Antônio VIANA
Gerente de Operações DRS

Leonardo BRAGA
Gerente Sênior DRS e Filtro Prensa

RESUMO

Este artigo apresenta uma estratégia técnico-operacional focada na economia circular para a estruturação, manutenção e alteamento de acessos operacionais em pilhas de resíduos, mitigando os desafios impostos pela sazonalidade climática. Durante o período chuvoso, o resíduo apresenta perda de resistência e trafegabilidade, exigindo o uso de laterita como camada estruturante provisória. No procedimento convencional, o avanço da disposição demanda a remoção dessa laterita, que costuma ser descartada junto ao resíduo, gerando consumo contínuo de material natural. A inovação proposta altera essa dinâmica ao introduzir a remoção controlada, a segregação e o reaproveitamento da laterita. O material removido é classificado e a fração ainda apta é reincorporada aos ciclos subsequentes de alteamento dos acessos. Os resultados da operação demonstram que a estratégia alcança uma taxa de reaproveitamento superior a 65% da laterita removida. Essa prática reduz drasticamente a necessidade de material novo, aliviando a pressão sobre áreas de empréstimo e otimizando o transporte interno de maquinário. Conclui-se que o reaproveitamento da laterita, quando pautado por critérios técnicos de segregação, é uma alternativa altamente eficaz e sustentável, transformando um insumo de descarte em recurso recirculante, sem comprometer a segurança e a estabilidade da operação.

ABSTRACT

This article presents a technical-operational strategy focused on the circular economy for the structuring, maintenance, and raising of operational access roads in waste piles, mitigating the challenges imposed by climate seasonality. During the

rainy season, the waste loses strength and trafficability, requiring the use of laterite as a temporary structural layer. In the conventional procedure, the advancement of waste disposal demands the removal of this laterite, which is often discarded along with the waste, generating a continuous consumption of natural material. The proposed innovation alters this dynamic by introducing the controlled removal, segregation, and reuse of the laterite. The removed material is classified, and the suitable fraction is reincorporated into subsequent access raising cycles. Operational results show that the strategy achieves a reuse rate of over 65% of the removed laterite. This practice drastically reduces the need for new material, easing the pressure on borrow areas and optimizing internal machinery transport. It is concluded that laterite reuse, when guided by technical segregation criteria, is a highly effective and sustainable alternative, transforming a discarded input into a recirculating resource, without compromising the safety and stability of the operation.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização dos acessos operacionais

A operação de pilhas de disposição de resíduos exige a manutenção contínua de acessos capazes de permitir o tráfego seguro de equipamentos, o deslocamento de equipes, a realização de inspeções, a execução de manutenções e o avanço das frentes de disposição. Em estruturas desse tipo, os acessos apresentam caráter predominantemente operacional e provisório, uma vez que acompanham a evolução da pilha e precisam ser ajustados conforme as etapas de alteamento e recomposição da superfície.

A condição dos acessos influencia diretamente a segurança, a produtividade e a previsibilidade da operação. A perda de trafegabilidade pode gerar atrasos, restrições de circulação, aumento de intervenções corretivas, maior exposição de equipamentos a condições adversas e dificuldade de atendimento às rotinas operacionais. Por essa razão, a estruturação adequada dos acessos constitui uma atividade essencial para a gestão de pilhas de resíduos, conforme evidenciado na Figura 1, especialmente quando o material disposto apresenta comportamento sensível à umidade.



Figura 1 – Acesso operacional estruturado durante o verão.

1.2 Efeito da sazonalidade climática

A operação de pilhas de disposição de resíduos exige a manutenção contínua de acessos capazes de permitir o tráfego seguro de equipamentos, o deslocamento de equipes, a realização de inspeções, a execução de manutenções e o avanço das frentes de disposição. Segundo a Mining Association of Canada [1], a gestão de estruturas de disposição deve ser apoiada por rotinas de operação, manutenção e vigilância, com definição de responsabilidades, controles operacionais e acompanhamento do desempenho ao longo do ciclo de vida da estrutura. Nesse contexto, os acessos apresentam caráter predominantemente operacional e provisório, uma vez que acompanham a evolução da pilha e precisam ser ajustados conforme as etapas de alteamento, conformação e recomposição da superfície.

Esse formato impõe a necessidade de soluções capazes de manter condições mínimas de tráfego ao longo de todo o ano. No período seco, os acessos demandam principalmente padronização, regularização e suporte ao tráfego. No período chuvoso, sua função torna-se ainda mais crítica, pois está associada à mitigação de erosões, à redução de deformações, ao controle de pontos de acúmulo de água e à manutenção da segurança operacional. Thompson e Visser [2] destacam que o desempenho funcional das vias operacionais está diretamente relacionado à qualidade da superfície de rolamento, à manutenção da camada de revestimento, à segurança do tráfego, ao desgaste de equipamentos e aos custos operacionais, reforçando a importância da estruturação adequada dos acessos para a produtividade e previsibilidade da operação.

1.3 Justificativa para uso e reaproveitamento da laterita

A laterita é empregada como material de reforço nos acessos operacionais devido à sua melhor aptidão para formação de camadas de tráfego quando comparada ao resíduo disposto. Nogami e Villibor [3] destacam que solos lateríticos, quando devidamente selecionados e compactados, podem apresentar desempenho satisfatório em camadas de pavimentos, especialmente em regiões tropicais, contribuindo para a melhoria da capacidade de suporte e para o controle de deformações. Nesse sentido, sua aplicação nos acessos operacionais contribui para aumentar a regularidade geométrica, reduzir deformações superficiais e preservar a trafegabilidade em condições climáticas adversas conforme disposto na Figura 2.

Entretanto, a utilização recorrente de laterita também implica consumo contínuo de material natural, mobilização de equipamentos, transporte interno e dependência de áreas de empréstimo. No procedimento convencional, à medida que a pilha evolui, a camada laterítica aplicada nos acessos é removida, a superfície é recomposta com resíduo e uma nova camada de laterita é executada sobre o novo nível operacional.

Esse ciclo, embora funcional, pode resultar em perda de material ainda apto para uso. Diante desse contexto, o reaproveitamento controlado da laterita removida surge como alternativa para reduzir o consumo de material novo sem comprometer a função operacional dos acessos. Essa abordagem está alinhada às diretrizes de uso racional de materiais em infraestrutura viária, que recomendam o aproveitamento de materiais locais ou reciclados sempre que atendam aos requisitos técnicos de desempenho da camada executada [4].

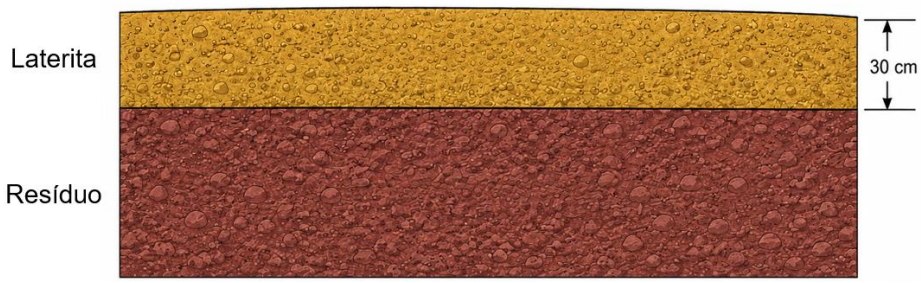


Figura 2 - Representação esquemática da camada de laterita sobre o resíduo.

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA OPERACIONAL

2.1 Procedimento convencional

O procedimento convencional de estruturação dos acessos consiste na aplicação de laterita sobre a superfície do resíduo, formando uma camada provisória destinada a garantir trafegabilidade e suporte operacional. Essa camada é utilizada durante determinado ciclo de operação e acompanha a evolução das frentes de disposição da pilha.

À medida que ocorre o avanço da disposição, torna-se necessário remover os acessos existentes para permitir a recomposição da superfície com resíduo e a continuidade do alteamento. Após essa etapa, uma nova camada de laterita é executada sobre o novo nível operacional, restabelecendo as condições de tráfego.

De forma simplificada, o ciclo convencional pode ser descrito pelas seguintes etapas exibidas na Figura 3:

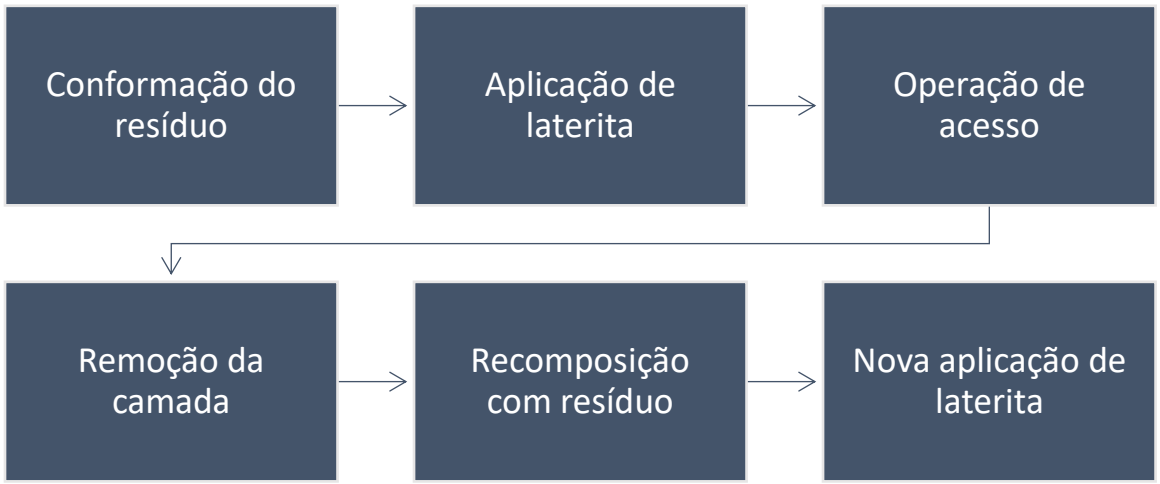


Figura 3 - Fluxograma do procedimento convencional.

Esse processo assegura a continuidade da operação e permite adaptar os acessos ao avanço da pilha. No entanto, quando não há segregação e reaproveitamento da laterita removida, todo novo ciclo tende a demandar nova quantidade de material laterítico.

2.2 Limitações do modelo convencional

A principal limitação do modelo convencional está associada ao consumo recorrente de laterita nova. Mesmo quando parte da camada removida ainda apresenta condições físicas compatíveis com sua função como material de acesso, a ausência de um fluxo formal de reaproveitamento pode levar ao descarte operacional desse potencial de reutilização.

Além do consumo de material, o modelo convencional aumenta a necessidade de carga, transporte, espalhamento e conformação de nova laterita. Esse conjunto de atividades pode gerar maior tempo de recomposição dos acessos, maior número de viagens internas, maior utilização de equipamentos e maior dependência de disponibilidade de material de empréstimo.

Outro ponto relevante é o retrabalho associado à repetição do ciclo. A laterita é aplicada para garantir trafegabilidade, removida durante o alteamento, substituída por resíduo e posteriormente reaplicada como nova camada. Quando não há reaproveitamento, parte da eficiência do processo é perdida, pois o material que já havia sido mobilizado e utilizado deixa de retornar ao ciclo operacional.

2.3 Oportunidade de melhoria

A oportunidade de melhoria está na incorporação de uma etapa de reaproveitamento controlado da laterita removida. A proposta não altera a necessidade de remoção dos acessos nem a recomposição da superfície com resíduo, mas introduz uma lógica de segregação e reutilização da fração de laterita que mantém condições adequadas para nova aplicação.

Dessa forma, a laterita deixa de ser tratada exclusivamente como material de consumo recorrente e passa a ser gerida como recurso operacional recirculante. Essa mudança permite reduzir a demanda por material novo, otimizar as movimentações internas e aproximar o processo de manutenção dos acessos de práticas de economia circular aplicadas à operação geotécnica.

3. METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 Fluxo operacional com reaproveitamento

A metodologia proposta baseia-se na comparação entre o cenário convencional e o cenário otimizado com reaproveitamento. No cenário otimizado, a remoção da camada laterítica é realizada de forma controlada, buscando minimizar a mistura com o resíduo subjacente. Em seguida, o material removido é segregado e avaliado quanto à sua condição de uso.

A fração considerada adequada é reaplicada na estruturação dos acessos, enquanto o material excessivamente misturado ao resíduo, com umidade elevada ou sem condição de suporte é destinado à recomposição ou a usos sem função principal de camada de tráfego. Quando a quantidade reaproveitada não é suficiente para recompor a seção necessária do acesso, realiza-se complementação com laterita nova.

O fluxo operacional proposto é composto pelas seguintes etapas:



Figura 4 - Fluxo otimizado com remoção controlada, segregação e reaproveitamento da laterita.

3.2 Critérios de aceitação da laterita reaproveitada

Para garantir que o reaproveitamento não comprometa a segurança e o desempenho dos acessos, foram definidos critérios mínimos de aceitação da laterita removida. Esses critérios podem ser aplicados inicialmente por inspeção visual e validação operacional, podendo ser complementados por ensaios de campo ou laboratório em trechos críticos.

Tabela 1 – Critérios de aceitação da laterita reaproveitada

Grupo de avaliação	Critérios considerados	Condição esperada
Condição física	Umidade, textura e presença de finos	Material compatível com espalhamento, conformação e tráfego
Contaminação	Mistura com resíduo ou impurezas	Baixa mistura visual e ausência de elementos inadequados
Aplicabilidade	Facilidade de escavação, transporte e reaplicação	Material reaplicável sem perda significativa de função
Desempenho	Suporte, trafegabilidade e drenagem superficial	Acesso estável após conformação e liberação
Segurança operacional	Ausência de deformações críticas ou pontos de instabilidade	Condição compatível com o tráfego previsto

Quando a laterita removida apresenta excesso de umidade, comportamento pastoso, mistura elevada com resíduo ou perda de capacidade de suporte, recomenda-se que o material não seja utilizado como camada principal de tráfego. Nesses casos, o material pode ser direcionado para recomposição da superfície ou regularização, sem função estrutural predominante.

3.3 Indicadores de avaliação

A avaliação da estratégia foi estruturada a partir de indicadores técnicos, operacionais e ambientais. Esses indicadores permitem comparar o desempenho do modelo convencional com o modelo otimizado e medir os benefícios decorrentes do reaproveitamento.

Tabela 2 – Indicadores de avaliação da estratégia de reaproveitamento

Indicador	Finalidade
Taxa de reaproveitamento	Medir o percentual de laterita removida que retorna ao processo
Consumo de laterita nova	Comparar a demanda de material antes e depois da melhoria
Viagens internas evitadas	Avaliar redução de transporte e movimentação de material
Condição de trafegabilidade	Validar o desempenho operacional dos acessos
Intervenções corretivas	Verificar a estabilidade da solução ao longo do ciclo

A taxa de reaproveitamento foi considerada como a relação entre o volume de laterita reutilizada e o volume total de laterita removida no ciclo operacional analisado. Essa métrica permite quantificar a eficiência do processo e acompanhar sua evolução ao longo dos ciclos de alteamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Reaproveitamento da laterita

A aplicação da estratégia demonstrou potencial de reaproveitamento de aproximadamente 65% da laterita removida dos acessos operacionais. Esse resultado indica que parcela significativa do material aplicado mantém condições adequadas para retornar ao processo, desde que a remoção seja realizada de forma controlada e que haja segregação entre a fração reaproveitável e a fração excessivamente misturada ao resíduo.

Tabela 3 – Comparação entre o procedimento convencional e o procedimento com reaproveitamento de laterita

Ciclo operacional	Cenário convencional	Cenário com reaproveitamento
Implantação inicial	Aplicação integral de laterita nova	Aplicação parcial de laterita nova
Primeiro alteamento	Nova aplicação integral	Reaproveitamento parcial + complementação
Ciclos subsequentes	Consumo recorrente integral	Consumo reduzido de laterita nova
Gestão do material removido	Sem retorno ao processo	Segregação e reutilização controlada

A principal mudança promovida pela estratégia é a transformação da laterita removida em insumo recirculante dentro da operação, reduzindo o consumo acumulado de material natural ao longo do tempo. A aplicação da laterita reaproveitada é vista na Figura 5:



Figura 5 - Etapas controladas de segregação, reaplicação e conformação da laterita reaproveitada.

4.2 Ganhos operacionais

A redução do consumo de laterita nova representa o ganho mais evidente da estratégia, mas não é o único benefício operacional. A reutilização do material já mobilizado reduz a dependência de fornecimento de laterita, diminui a necessidade de transporte interno e permite maior agilidade na recomposição dos acessos.

A disponibilidade de material reaproveitável próximo ao ponto de aplicação contribui para reduzir o tempo de resposta da operação, especialmente em períodos nos quais a manutenção dos acessos é intensificada pelas chuvas. Além disso, a segregação e o registro dos volumes reaproveitados permitem maior previsibilidade no planejamento das atividades de carga, transporte, espalhamento e conformação.

Outro ganho relevante está relacionado à redução de retrabalho. Ao reaproveitar parte da laterita removida, o processo passa a preservar o valor operacional do material já aplicado, evitando que ele seja integralmente substituído por laterita nova em cada ciclo de alteamento, com o comparativo evidenciado na Figura 6.

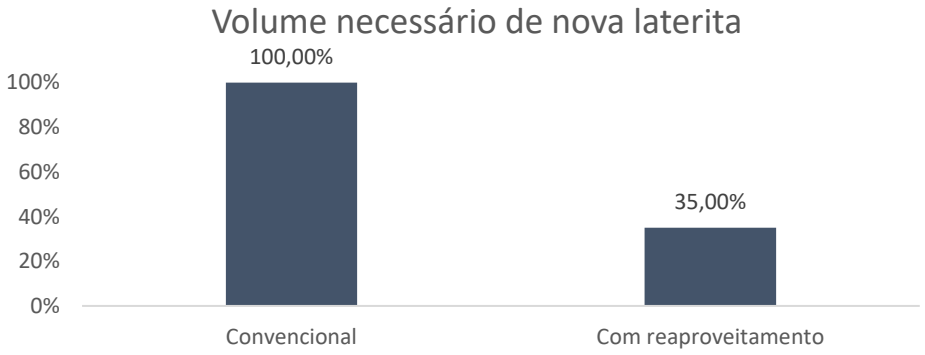


Figura 6 - Comparação conceitual do consumo de laterita nova entre o procedimento convencional e o procedimento com reaproveitamento.

4.3 Desempenho em períodos seco e chuvoso

A solução mantém a função original da laterita como camada de reforço adaptada às condições climáticas sazonais. No período seco, a camada contribui para a padronização geométrica dos acessos, melhoria da regularidade superficial e suporte ao tráfego operacional. No período chuvoso, sua função torna-se ainda mais crítica, pois auxilia na redução de deformações, mitigação de erosão superficial e preservação das condições de drenagem e circulação.

O reaproveitamento controlado não deve ser interpretado como flexibilização dos critérios de desempenho dos acessos. Ao contrário, a prática exige maior controle sobre a qualidade do material reaplicado. A laterita reaproveitada deve manter condições compatíveis com sua função operacional, especialmente em trechos de maior solicitação, maior umidade ou maior frequência de tráfego.

Assim, a estratégia combina dois objetivos complementares: preservar a funcionalidade dos acessos durante as variações climáticas e reduzir o consumo acumulado de laterita nova nos ciclos subsequentes.

4.4 Ganhos ambientais e de sustentabilidade

O reaproveitamento da laterita está alinhado a princípios de sustentabilidade operacional e economia circular. Em vez de tratar a camada removida como perda do processo, a operação passa a reconhecer o valor residual do material e a reincorporá-lo ao próprio ciclo de manutenção dos acessos.

A prática contribui para a redução da pressão sobre áreas de empréstimo, diminuição da movimentação de material natural, menor necessidade de transporte interno e

redução indireta de emissões associadas à operação de equipamentos. Embora o objetivo primário seja garantir trafegabilidade e segurança, os benefícios ambientais representam resultado relevante para a gestão de estruturas de disposição de resíduos.

Ao mensurar a taxa de reaproveitamento e acompanhar o desempenho dos acessos reexecutados, torna-se possível incorporar indicadores de sustentabilidade à rotina operacional, conectando decisões de campo a metas de eficiência material e redução de impactos.

4.5 Remoção controlada

A remoção da camada de laterita deve ser executada de forma planejada, buscando reduzir a mistura com o resíduo subjacente. Quanto menor a contaminação da laterita removida, maior tende a ser o potencial de reaproveitamento. Para isso, recomenda-se definir previamente os trechos a serem removidos, orientar a equipe de operação quanto à espessura de retirada e evitar escavações excessivas que incorporem grande quantidade de resíduo ao material laterítico.

Com base na experiência operacional observada nos ciclos de remoção e reaplicação da laterita, verificou-se que a camada de 30 cm apresenta comportamento diferenciado ao longo de sua espessura. De forma aproximada, os 5 cm superiores tendem a sofrer maior interação com o tráfego, intemperismo, umidade e materiais superficiais, enquanto os 5 cm inferiores apresentam maior interface com o resíduo disposto, conforme Figura 7.

Assim, a faixa intermediária, com cerca de 20 cm, foi considerada a porção com maior potencial de reaproveitamento direto, desde que mantidas condições adequadas de umidade, textura, segregação e capacidade de suporte. Essa divisão não representa um limite rígido, mas uma referência prática para orientar a remoção controlada, a classificação do material e a maximização do reaproveitamento da laterita em campo.



Figura 7 - Estratificação aproximada da camada de laterita para orientação da remoção controlada.

4.6 Remoção controlada

Após a remoção, o material deve ser segregado em categorias operacionais simples. Recomenda-se classificar a laterita removida em três grupos:

Tabela 4 – Classificação operacional da laterita removida para fins de reaproveitamento.

Categoria	Condição do material	Destinação recomendada
Laterita reaproveitável	Baixa mistura visual, umidade adequada e boa condição de reaplicação	Reutilizar como camada de acesso
Laterita parcialmente reaproveitável	Mistura ou umidade moderada	Usar em trechos menos solicitados ou combinar com laterita nova
Material inadequado para camada de tráfego	Excesso de resíduo, umidade elevada ou comportamento pastoso	Usar apenas em recomposição ou descartar como camada estrutural

Essa classificação permite padronizar a tomada de decisão em campo e reduzir a subjetividade na escolha do material a ser reaplicado.

4.7 Reaplicação e complementação

A reaplicação deve priorizar o uso da laterita reaproveitada apta, complementando-se com laterita nova apenas quando necessário para atingir a espessura, regularidade e condição de suporte desejadas. O material reaproveitado deve ser espalhado, conformado e nivelado de forma a garantir superfície contínua, com caimentos adequados para drenagem e ausência de pontos de acúmulo de água.

Nos trechos de maior solicitação operacional, recomenda-se utilizar material de melhor qualidade ou complementar a camada com laterita nova, preservando o desempenho do acesso. Em trechos secundários ou de menor solicitação, pode-se admitir maior proporção de material reaproveitado, desde que mantidas as condições mínimas de trafegabilidade e segurança.

4.8 Reaplicação e complementação

A implantação da prática deve ser acompanhada por registros de campo que permitam avaliar o desempenho da solução ao longo do tempo. Recomenda-se registrar, por trecho ou ciclo operacional:

- localização do acesso recomposto;
- volume estimado de laterita removida;
- volume estimado de laterita reaproveitada;
- volume de laterita nova utilizado na complementação;
- condição visual do material reaproveitado;
- condição final do acesso após liberação;
- ocorrências de erosão, deformação ou perda de trafegabilidade;
- necessidade de intervenções corretivas.

A rastreabilidade permite consolidar o histórico de desempenho, identificar trechos com maior potencial de reaproveitamento, ajustar critérios de aceitação e subsidiar futuras revisões do procedimento operacional.

5. CONCLUSÕES

A estruturação de acessos operacionais em pilhas de resíduos é essencial para garantir a continuidade das operações, a segurança de tráfego e a capacidade de resposta da manutenção em diferentes condições climáticas. Em ambientes sujeitos a sazonalidade marcada, a utilização de laterita como camada de reforço desempenha papel importante na preservação da trafegabilidade, especialmente durante períodos chuvosos, quando o resíduo disposto tende a apresentar maior sensibilidade à umidade, erosão superficial e deformações.

O procedimento convencional de remoção e reexecução dos acessos, embora funcional, pode gerar consumo recorrente de laterita nova a cada ciclo de alteamento da pilha. A estratégia apresentada neste artigo propõe a inserção de uma etapa de reaproveitamento controlado da laterita removida, permitindo que a fração ainda apta seja reincorporada ao processo operacional.

Os resultados indicam potencial de reaproveitamento de aproximadamente 65% da laterita removida, com redução proporcional da demanda por material novo nos ciclos subsequentes. Essa prática contribui para menor consumo de material natural, menor necessidade de transporte interno, redução de movimentações operacionais e maior eficiência no processo de manutenção dos acessos.

Do ponto de vista ambiental, a solução se alinha a princípios de economia circular e gestão sustentável de recursos, ao transformar um material anteriormente tratado como consumo recorrente em insumo reutilizável dentro da própria operação. Do ponto de vista operacional, a prática aumenta a previsibilidade do ciclo de manutenção e pode reduzir intervenções corretivas associadas à perda de trafegabilidade.

A adoção segura do reaproveitamento depende de critérios técnicos mínimos de aceitação, segregação adequada, controle de umidade, verificação da condição final dos acessos e rastreabilidade por trecho executado. Dessa forma, o reaproveitamento da laterita não deve ser entendido apenas como redução de consumo, mas como uma melhoria estruturada no processo de gestão dos acessos operacionais da pilha.

Conclui-se que a estratégia proposta é simples, replicável e tecnicamente compatível com a rotina operacional de estruturas de disposição de resíduos, podendo ser incorporada como prática de otimização em operações que utilizam laterita ou materiais naturais semelhantes para melhoria de acessos provisórios.

6. PALAVRAS-CHAVE

Economia Circular, Reaproveitamento de Laterita, Acessos Operacionais, Pilha de Resíduos, Sazonalidade Climática.

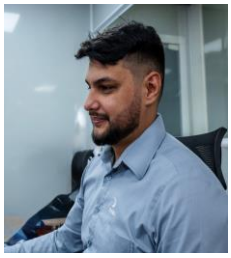
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MINING ASSOCIATION OF CANADA. Developing an Operation, Maintenance, and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities. Version 2.1. Ottawa: Mining Association of Canada, 2021.

[2] THOMPSON, R. J.; VISSER, A. T. The functional design of surface mine haul roads. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, v. 100, n. 3, p. 169-180, 2000.

[3] NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Use of lateritic fine-grained soils in road pavement base courses. Geotechnical and Geological Engineering, v. 9, p. 167-182, 1991.

[4] TRANSPORT RESEARCH LABORATORY — TRL. Road Note 31: A Guide to the Structural Design of Surfaced Roads in Tropical and Sub-Tropical Regions. 5th ed. Crowthorne: TRL, 2023.

	**Pedro LIMA** Engenheiro Civil e de Produção, especialista em Engenharia Geotécnica e Rodoviária, com MBA em Gestão de Projetos. Atua na Hydro na operação e disposição de resíduos, com experiência em infraestrutura, geotecnia, construção e manutenção rodoviária, além de gestão de projetos industriais e operacionais.
	**Eduardo LIMA** Engenheiro de Minas formado pela UNIFESSPA, com atuação na Norsk Hydro nas áreas de manutenção civil, orçamento, planejamento e empilhamento de rejeito filtrado. Experiência em gestão operacional e melhoria de processos no DRS. MBA em Dados e Inteligência Artificial em andamento, com foco em inovação, análise de dados e engenharia aplicada.
	**Reginaldo ÁLVARES JR** Engenheiro Civil, especialista em Geotecnia, com experiência em manutenção de infraestrutura de mineração, otimização de processos de disposição de rejeitos e melhoria da eficiência operacional. Atuação em projetos de inovação para a indústria de alumínio, com foco em sustentabilidade, segurança hídrica e redução de consumo energético.
	**Antônio VIANA** Gerente de Operação de Depósito de Resíduos de Bauxita na Hydro Alunorte, atuando em gestão operacional, segurança de barragens, disposição de resíduos e projetos industriais. Engenheiro Civil com mais de 18 anos de experiência em mineração, geotecnia e infraestrutura. Especialista em Engenharia Geotécnica, com Mestrado em Engenharia de Produção.

	**Leonardo BRAGA** Gerente Sênior na Norsk Hydro | Engenheiro Mecânico com MBA pela FGV - Fundação Getulio Vargas e especializações em Gestão de Ativos e Tecnologia Mineral. Mais de 20 anos de experiência em operação, manutenção e gestão industrial na Hydro, Vale e MRN, liderando grandes equipes, projetos estratégicos, segurança operacional e iniciativas de alta performance na mineração e indústria de alumina.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.2
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

IMPLANTAÇÃO DO FILTRO PRENSA E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUO DE BAUXITA FILTRADO: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO AMAZÔNICA

Ronaldo PANTOJA

Coordenador de Geotecnia - Hydro Alunorte

Paschoal CATALDI
Gerente Executivo - Hydro Alunorte

Amanda Damasceno
Engenheiro Geotécnica- Hydro Alunorte

Adriano CIUFFI
Engenheiro de Projetos - Hydro Alunorte

João Wendell SANTOS
Coordenador de Projetos - Hydro Alunorte

RESUMO

A gestão adequada de resíduos em estruturas de armazenamento é o ponto chave para o sucesso ou insucesso das operações em grandes empresas de mineração, nesse contexto a Alunorte em 2010 iniciou os estudos de secagem de resíduo de bauxita apoiado por consultorias e seu corpo técnico tanto da área de processos químicos quanto da engenharia geotécnica. Visando a redução da umidade do resíduo de bauxita oriundo do processo Bayer e filtrados em filtros tambor que produziam resíduo com teor de sólido da ordem de 60%, iniciou-se uma bateria de testes com três unidades pilotos de filtro prensa com objetivo de reduzir a umidade do resíduo e posteriormente testar sua disposição no sistema de armazenamento através de equipamentos mecânicos. Após a realização dos testes e com os objetivos de redução de umidade alcançados, tiveram início os tetes de disposição em diferentes umidades para assim encontrar os parâmetros que garantissem um grau de compactação e umidade ótima e assim dispor em forma de aterro compactado. Os testes foram realizados com os seguintes equipamentos:(trator de esteira, rolos compactadores), diferentes umidades foram testadas para verificação da trabalhabilidade e definição do equipamento que tivesse o melhor desempenho através dos resultados encontrados, tais como: densidade, umidade ótima, grau de compactação. Parâmetros como angulo de atrito, peso específico e permeabilidade também foram encontrados e nortearam um novo projeto de disposição que promoveu ganhos operacionais, ambientais e de segurança. Algumas particularidades no novo método de disposição são os grandes desafios numa região de alto índice pluviométrico, como a de garantir a qualidade na disposição do resíduo seco em dias chuvosos sem comprometer a estabilidade do aterro e sem interromper a produção da planta. Após os anos de operação desde a implantação já ocorreram duas campanhas de verificações de performance do maciço dos aterros onde foram verificados todos os parâmetros de projetos e comprovados seus desempenhos satisfatórios.

ABSTRACT

The proper management of waste in storage structures is the key point for the success or failure of operations in large mining companies, in this context Alunorte in 2010 started studies on drying bauxite residue supported by consultancies and its technical staff in the area of chemical processes and geotechnical engineering. In order to reduce the moisture of the bauxite residue from the Bayer process and filtered in drum filters that produced residue with a solid content of around 60%, a battery of tests was started with three pilot units of filter press in order to reduce the moisture of the residue and later test its disposal in the storage system through mechanical equipment. After carrying out the tests and with the objectives of moisture reduction achieved, the disposal tests in different humidity began in order to find the parameters that would guarantee a degree of compaction and optimal humidity and thus dispose in the form of a compacted landfill. The tests were carried out with the following equipment: (bulldozer, compactors), different humidity was tested to verify the workability and definition of the equipment that had the best performance through the results found, such as: density, optimal moisture, degree of compaction. Parameters such as friction angle, specific weight and permeability were also found and guided a new layout design that promoted operational, environmental and safety gains. Some particularities in the new disposal method are the great challenges in a region with high rainfall, such as ensuring the quality of the disposal of dry waste on rainy days without compromising the stability of the landfill and without interrupting the plant's production. After years of operation, since its implementation, there have already been two campaigns to verify the performance of the landfill mass, where all project parameters were verified and their satisfactory performance was proven.

1. INTRODUÇÃO

As barragens de rejeitos de maneira geral funcionam como um reservatório de rejeitos e água, devido aos métodos de disposição existentes, isso ocorre devido as características dos processos de beneficiamento das mineradoras e refinarias, que utilizam uma concentração de água bastante elevada nesse processo, resultando em um resíduo com teor de sólidos baixos e que oferecem riscos as estruturas de barramento devido a um fenômeno conhecido como liquefação. Diante dessa situação verificou-se a necessidade de estudar uma nova tecnologia que promovesse o desaguamento dos resíduos, tornando-os mais secos e proporcionando uma nova forma de disposição em barragens.Com essa nova tecnologia, a disposição se torna mais segura pois pode ser empregada a compactação controlada ,o que garante uma maior estabilidade com o aumento do fator de segurança e com a eliminação da água também diminui os riscos de rupturas.Com essa nova tecnologia, novas barragens poderão ser projetadas para armazenar resíduos depois de filtrado por filtros prensa, sendo o teor de sólidos do resíduo na saída dos filtros => 78%. O resíduo é espalhado e compactado formando uma pilha com geometria definida e estável, reduzindo riscos de acidentes geotécnico.

Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo:

1-Relatar os resultados da filtrabilidade da lama vermelha do segundo estágio de lavagem da área XX utilizando filtros prensa pilotos,das empresas A,B e C.

2-Relatar o comportamento da lama gerada pelos filtros prensa nos testes pilotos, para conhecer suas propriedades geomecânicas para disposição em barragens e sitemas de armazenamento de resíduos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de avaliar a filtrabilidade do resíduo de bauxita oruindo do processo Bayer, foram realizadas uma bateria de testes com três fornecedores de filtro prensa, A,B,C. Para o teste foi utilizado um filtro prensa piloto formato 800 x 800 mm, tipo Diafragma Misto com placas de filtragem em polipropileno GK4 e espessura de torta 35 mm antes da pressurização dos diafragamas, com lonas de filtragem em polipropileno cód. 211 e acabamento por calandragem.

Filtragem do Resísduo de Bauxita:

Feito a interligação do dreno de sucção da bomba P-28D 08A com o tanque de alimentação do filtro piloto.

Para a utilização do condensado de lavagem das tortas, utilizamos tot-bin como reservatório devido a dificuldade de conexão da sucção da bomba com o ponto disponível para isto.

Na etapa final dos testes, coletamos aproximadamente 2m³ de polpa do underflow do clarificador da área 03D para confirmação de consumo de ar no processo de filtração, filtramos 1m³ de lama vermelha proveniente do último estágio de lavagem das linhas 1, 2 e 3.A figura 1 representa o fluxograma simplificado do processo com o filtro prensa instalado.

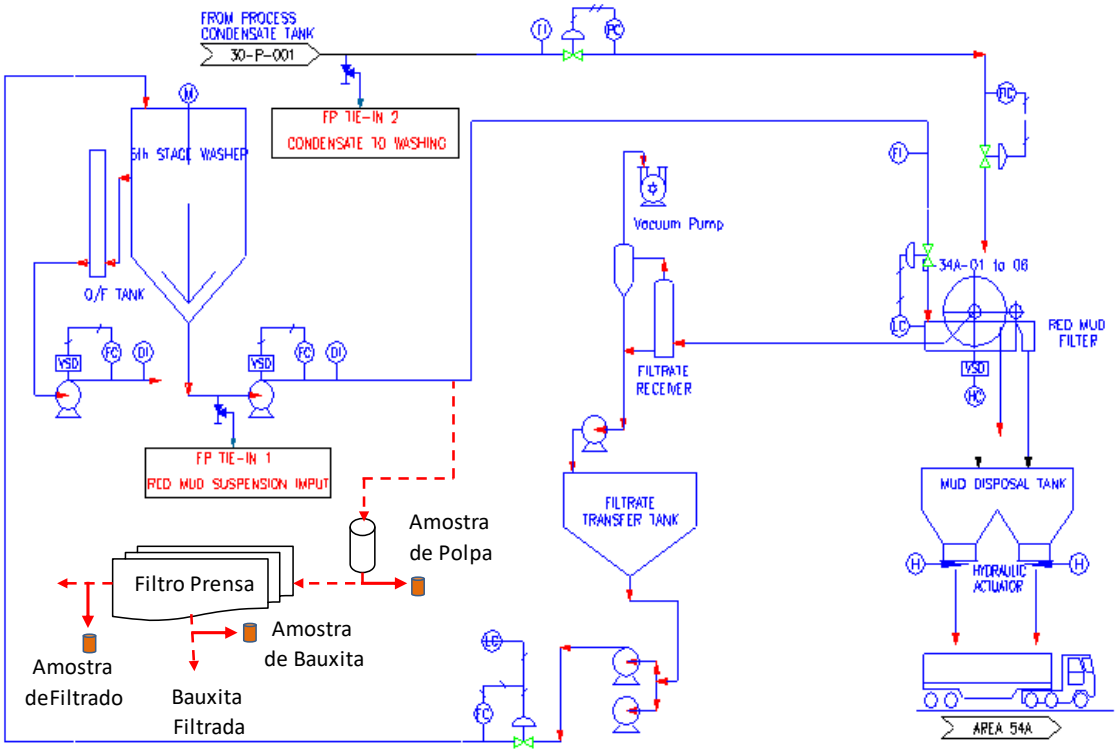


Fig. 1 - Fluxograma do processo A-28

PROCEDIMENTOS E OBSERVAÇÕES

Para cada teste os principais parâmetros de controle foram registrados, tais como: pressões de alimentação, da secagem da torta e da pressurização das membranas, pressão do condensado de lavagem e volume utilizado. Da mesma forma os tempos de alimentação, pressurização, secagem e lavagem da torta. A figura 02 demonstra o fluxograma de operação do filtro prensa.

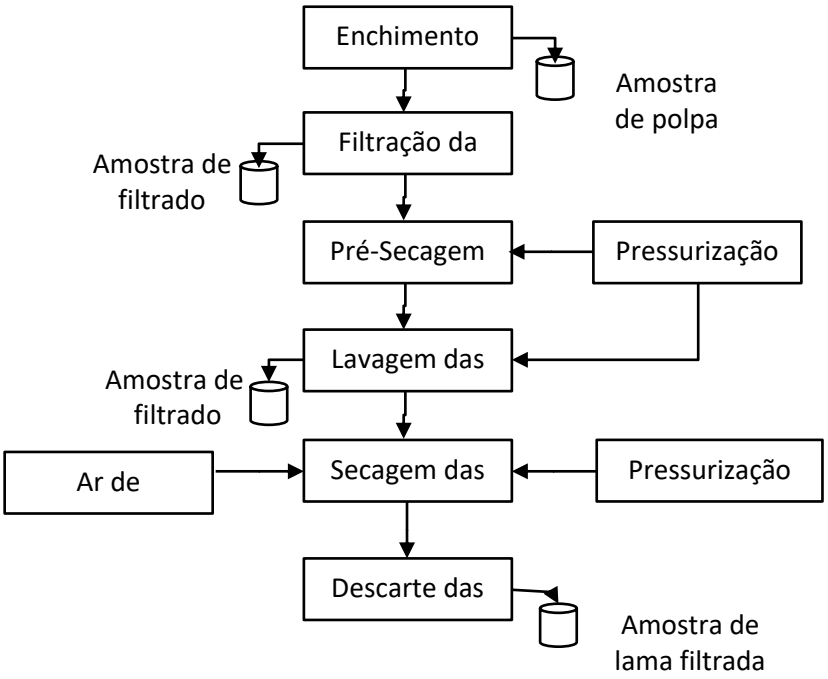


Fig. 2 – Fluxogramas de operação do filtro prensa neste teste

2.1 Ensaio de Reprodução do Sistema de filtragem com filtro piloto

Como produto da filtração teremos: Filtrado sem lavagem, filtrado durante a lavagem que retorna em contra fluxo para lavar a polpa e lama vermelha filtrada.

Os testes foram realizados no período de 20-09-2010 a 01-10-2010 na área 28, mais especificamente no T-28D-08.Para a obtenção de uma baixa umidade, parâmetros como pressão de secagem e vazão de ar comprimido são os únicos necessários. A figura 3 apresenta a torta obtida pela filtragem teste.



Fig. 03 Filtro prensa piloto Alunorte 2010.

Nº Teste	PRODUTO	
	Umidade (%)	Teor Sólidos (%)
1	21,9	78,1
2	23,0	77,0
3	19,1	80,9
4	20,7	79,3
5	20,1	79,9
6	18,3	81,7
7	19,6	80,4
8	19,6	80,4
9	20,2	79,8
10	21,1	78,9
11	20,4	79,6

Tabela 1- Resultado dos testes pilotos com Filtro Prensa (2010).

.

2.2 Testes com resíduo de bauxita filtrado nos testes pilotos

As premissas adotadas para análise das eficácias dos filtros tanto de tambor quanto prensa, foram as seguintes conforme parágrafos a e b.

Realização de testes de filtragem e três diferentes fornecedores de filtro prensa, para verificação de desempenho e eficácia no desaguamento do resíduo de bauxita quanto ao teor de sólidos alcançado, T.S >=78% (Figura 23). Uma concentração de sólidos da lama vermelha descartada de pelo menos 78 % foi estabelecida como referência, os filtros convencionais de tambor atingem uma concentração de sólidos de cerca de 64%, e os resultados de teores de sólidos de três filtros foram satisfatórios após a filtração, atingindo valores superiores ao estabelecido. Após os testes, obteve-se uma pequena quantidade de resíduo, o qual foi estocado e posteriormente submetido a testes em uma pista experimental. A figura 4 iliustra o filtro tambor e o filtro prensa.



.

Fig. 04 Filtro Tambor e Filtro Pprensa.

a) Realização de testes em uma pista experimental visando sua disposição em forma de aterro controlado e realizar uma comparação dos parâmetros e suas principais vantagens e desvantagens em relação ao método até então praticado, filtro tambor. Consistiu em realizar os testes iniciais com o resíduo resultante dos testes pilotos, cerca de 16 toneladas (9m³) que se encontravam em “bags” foram içados por caminhão munck e empilhados na área definida para os testes. A área para o teste foi o depósito de resíduos sólidos 1, com dimensões de 5,0 m de largura x 20,0 m de comprimento e 2% de inclinação. Para a execução dos serviços, equipamentos mecânicos foram utilizados a saber:

- Trator de esteira D6;
- Carregadeira;
- Caminhão pipa;
- Caminhão basculante;
- Escavadeira.
- Laboratório de solos.

A disposição do resíduo grado pela filtração,seguiu ciclos de lançamento, espalhamento e compactação, a fim de simular o processo a ser empregado no novo sistema. Conforme apresenta a Figura 5.
Lançamento/Aterro:

1º. Verificação teor de sólidos previsto nos estudos;
2º. Utilização de um caminhão munck para construir uma pilha com o resíduo do filtro prensa;
3º. Observação do comportamento do resíduo sob ação de água;
4º. Coletou-se amostras para verificar o teor de sólidos posterior ao lançamento e compactação;



Fig. 05 Simulação de lançamento em pilha solta de resíduo filtrado.

5º. Pista teste e ensaios geotécnicos;:

6º. Utilizando o trator de esteira D6, o material foi espalhado com camada de cerca de 0,50 m de espessura;

7º. O equipamento empregado no espalhamento (D6) promoveu o processo de compactação;

8º. Após 2 passadas com o D6, foram executados ensaios para verificação da umidade e densidade (utilizar método “hilf”);

9º. Após 4 passadas com o D6, foram executados ensaios para verificação da umidade e densidade (utilizar método “hilf”).

Foram executados os seguintes ensaios, ilustrados na Figura 6:

- Teor de sólidos do resíduo antes de iniciar os trabalhos;
- Teor de sólidos após o processo de umedecimento da lama;
- Teor de sólidos após os processos de compactação da camada;
- Determinação da umidade e densidade in situ (Hilf) após os processos de compactação de todas as camadas;
- Ensaios de compactação do resíduo - Proctor Normal;
- Ensaios de caracterização – granulometria, LL e LP.



Fig. 06 execução de pista teste e ensaios geotécnicos.

Amostra	γ_d max (g/cm³)	$w_{ótima}$ (%)	TS (%)
AM-01	1,46	27,30%	78,55%
AM-02	1,53	26,60%	78,99%
AM-03	1,55	27,60%	78,37%
AM-04	1,47	28,10%	78,06%
AM-05	1,47	26,90%	78,80%
AM-06	1,55	27,00%	78,74%
AM-07	1,54	27,40%	78,49%
AM-08	1,54	27,60%	78,37%
Média	1,51	27,31%	78,55%

Tabela 2- Resultados principais dos ensaios geotécnicos e correlação com os testes pilotos com Filtro Prensa (2010).

3 Disposição atual de resíduo de Bauxita

A disposição do resíduo ocorre de formas diferentes, em função do clima amazônico, regras de operação são estabelecidas e zoneamentos das praças de disposição são necessárias, dessa forma e de acordo com as condições de umidade tanto oriundo do processo de filtragem quanto da ocorrência de períodos de pluviometria, a setorização se faz necessária, o que garante uma operação sem interrupção, e também a qualidade dos aterros asseguradas. Estruturas denominadas de Zona Estrutural, Zona Interna e Célula de Contingência, são cruciais para o sucesso da disposição, segurança e integridade das estruturas, aliados a uma gestão eficaz contemplada no balanço hídrico do runoff gerado.



Fig. 07 Disposição atual de resísduo de bauxita deaguado por filtro prensa .

3. DISCUSSÕES

Contudo, para avaliação da viabilidade técnica da dispsosição com rejeito filtrado é fundamental a análise das distâncias médias de transporte, uma vez que seu transporte se dá por correias transportadoras ou caminhões basculantes, representando um custo significativo de sua operação. Além disso, as condições climáticas da região onde se encontram essas estruturas têm importância singular na definição dos projetos, em especial no que diz respeito aos regimes de chuvas intensas, uma vez que as condições de compactação, sistemas de drenagens superficial e interna, e trafegabilidade nos acessos e nas frentes de disposição são cardeais para a operação dessas pilhas.

Nesse caso, a construtibilidade das pilhas devem ser avaliadas de forma a serem criadas regiões zoneadas para diferentes condições de trabalhabilidade decorrente da condição climática, para obedecer aos critérios construtivos de umidade e compactação. Deve-se segregar áreas específicas de operação que formam uma espécie de “bacia”, cujo papel principal é conter os rejeitos dispostos durante períodos chuvosos, e assegurar estabilidade global à pilha. Dentre as principais vantagens da operação de sistemas de disposição a seco de resísduo de bauxita filtrada podem ser citados:

- Maior estabilidade da pilha em aterro compactado;
- Elevada densidade do resíduo disposto;
- Maior capacidade dos depósitos;
- Elevada recuperação de água e insumos do processo;
- Maior controle de construção e operação;
- Reduzido potencial de risco geotécnico;
- Menores impactados ambientais, com melhores condições para o fechamento progressivo.

4. CONCLUSÕES

Como as análises indicaram, há necessidade de busca de uma solução de disposição mais segura. Os métodos convencionais nos últimos anos, vem demonstrando que melhorias devem ser feitas e no caso do método de filtração via úmida essa situação é ainda mais agravante, por se tratar de um gatilho devido alta concentração de água no rejeito resultante e a forma de disposição, que favorecem a grandes impactos ambientais quando gerenciado de forma errada e também não garantem ou promovem uma estabilidade aceitável da instalação de rejeitos. Ademais uma das formas mais seguras atualmente de disposição de rejeitos é a construção de aterros e ou pilhas com rejeitos desaguados por filtros prensa, nessa nova tecnologia de filtragem, os filtros prensa atingem um teor de sólido do rejeito de aproximadamente 78%., aós ser descarregado por filtros, o rejeito filtrado poderá ser transportado por correia transportadora até uma área de pilha, onde é retomado por carregadores que carregam caminhões para o transporte de rejeitos até o interior da instalação de rejeitos. Este material é então descarregado, espalhado e compactado para formando uma terro não saturados denso e estável.

5. PALAVRAS-CHAVE

Filtro prensa, compactação, resíduo de bauxita, umidade, teor de sólidos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALUNORTE. AVALIAÇÃO DA FILTRABILIDADE DA LAMA VERMELHA DA ÁREA 28 COM FILTRO PRENSA PILOTO. Barcarena, PA, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13029: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ÁVILA, J. P. et al. Dry Storage Technology - Strenght and pore pressure development and compactability of tailings. In: Proceedings of the 19th International 87 Symposium of ICSOBA - International Committee for Study of Bauxite, Alumina & Aluminium, Belém, PA, 2012.

CASTRO, M. et al. A New Technology for Dry Disposal of Alunorte's Bauxite Residue. Light Metasl, p. 109-112, 2013.

GUIMARÃES, N. C.; VALADÃO, G. E.; PERES, A. E. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. Rem: Revista Escola de Minas, Minas Gerais, v. 65, n. 4, 2012.

NERY, K. D. Caracterização geotécnica e avaliação da compactação de um resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa. [manuscrito]. 2013. xv, 143 f., enc.: il.

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. Hydrometallurgy, v. 108, n. 1-2, p. 33-45, June 2011.

ROBERTSON, A.; MACG, E.; SHAW, S. Risk Management for Major Geotechnical Structures on Mines. In: Proceedings of Computer Applications in the Mineral Industries (CAMI). Calgary, Alberta, Canadá, 2003.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C.; DA MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. Revista Matéria, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007.

SILVA, S. A. Critério de projeto de sistemas de disposição em pilhas de resíduos de alumina desaguados por filtro prensa. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

	**Amanda DAMASCENO** Engenheira Civil com experiência em geotecnia aplicada à mineração, atuando em segurança de barragens e depósitos de resíduos, estudos hidrológicos, trânsito de cheias, balanço hídrico e gestão de riscos geotécnicos. Possui atuação em análise hidrológica/hidráulica, monitoramento geotécnico, controles climatológicos e suporte técnico-operacional para estruturas de disposição de rejeitos e resíduos industriais. .
	**Paschoal CATALDI** Gerente Executivo da Área de Resíduos Bauxita e Alumina B&A Taillings Area Bauxita & Alumina da Hydro Alunorte, Especialista em Engenharia Geotécnica Fundações e Obras de Terra (INBEC/2019), Engenheiro Químico pela FEI,possui experiência em construção, projeto, gestão de barragens atuando na CBA e atualmente na Norsk Hydro Brasil.



Adriano CIUFFI

Engenheiro civil especialista em engenharia geotécnica, atuando em projetos voltados para a gestão de resíduos industriais de mineração. Experiência em projetos e fiscalização de obras geotécnicas, drenagem, instrumentação e terraplenagem, com foco em segurança e normas internacionais. Domínio de softwares técnicos e inglês avançado.



João Wendell SANTOS

Engenheiro civil especialista em gerenciamento de projetos e pós-graduado em geotecnia aplicada com experiência em liderança de projetos e construção pesada principalmente no que tange a fiscalização de obras, legislação e normas técnicas, análise de desenhos técnicos, sistemas construtivos, materiais de construção, planejamento de obras, topografia e controle de qualidade em obras industriais, como por exemplo projetos de óleo & gás, geração de energia, mineração, barragens e infraestrutura.



Ronaldo PANTOJA

Engenheiro Civil graduado pela Universidade Federal do Pará (UFPA 1999). Especialista em Lavra de Mina (UFPA/2004), Engenharia Geotécnica Fundações e Obras de Terra (Universidade Cidade de São PAULO/2016) e Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental (UFPA).Atuei nas áreas de terra e rocha e técnica como engenheiro da Camargo Corrêa na fase II da UHE Tucuruí e Eclusas (2001 a 2003 Atualmente na Hydro-Alunorte Alumina Do Norte Do Brasil S.A. na Diretoria de Resíduos Bauxita e Alumina, B&A Taillings Area, na coordenação da área de geotecnia e segurança de barragem.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.2
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

Operação Remota com Escavadeira Anfíbia na Limpeza de Estruturas Impermeabilizadas: Avanços em Segurança Hídrica e HSE

Giselle BARBOSA
Engenheira de Manutenção Civil

Kelson VIEIRA
Engenheiro de Manutenção Civil

Reginaldo ÁLVARES JR
Engenheiro de Manutenção Civil

Claudionor PINHO
Gerente Infraestrutura e Geotecnia

Leonardo BRAGA
Gerente Sênior DRS e Filtro Prensa

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre a aplicação de escavadeira anfíbia operada remotamente na limpeza de canais impermeabilizados associados ao manejo hídrico de uma refinaria de alumina. A solução foi avaliada quanto à remoção de sedimentos, recuperação da funcionalidade hidráulica, redução da exposição ocupacional e preservação visual da geomembrana. A metodologia envolveu inspeção prévia das estruturas, definição de controles operacionais para limitação de profundidade e contato com o revestimento, acompanhamento da execução, registro das condições antes e após a intervenção e inspeção visual da geomembrana após a limpeza. Os resultados indicaram melhoria das condições de escoamento, redução da necessidade de presença humana direta em áreas alagadas e ausência de danos aparentes à geomembrana nas áreas inspecionadas. Conclui-se que a operação remota com escavadeira anfíbia representa uma alternativa tecnicamente viável para a manutenção preventiva de estruturas impermeabilizadas, integrando segurança hídrica, proteção ambiental e redução de riscos ocupacionais.

ABSTRACT

This paper presents a case study on the application of a remotely operated amphibious excavator for the cleaning of lined containment basins and channels associated with the water management system of an alumina refinery. The solution was evaluated in terms of sediment removal, recovery of hydraulic functionality, reduction of occupational exposure, and visual preservation of the geomembrane liner. The methodology included prior inspection of the structures, definition of operational controls to limit excavation depth and contact with the liner, monitoring of the execution, records of conditions before and after the intervention, and visual

inspection of the geomembrane after cleaning. The results indicated improved flow conditions, reduced need for direct human presence in flooded areas, and no apparent damage to the geomembrane in the inspected areas. It is concluded that remote operation with an amphibious excavator represents a technically feasible alternative for the preventive maintenance of lined structures, integrating water security, environmental protection, and occupational risk reduction.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização da infraestrutura da Alunorte

A produção de alumina pelo processo Bayer gera resíduos sólidos finos e alcalinos, cuja disposição requer sistemas de contenção, drenagem, controle hídrico e monitoramento capazes de reduzir riscos ambientais e operacionais. A literatura técnica sobre resíduos de bauxita destaca que as propriedades físicas e químicas desse material, associadas ao volume gerado e à necessidade de controle da água, tornam a gestão de áreas de disposição um tema crítico para a indústria de alumina [1,2].

Em refinarias localizadas em regiões de elevada pluviosidade, a gestão hídrica assume papel ainda mais relevante. Eventos de chuva intensa podem promover o carreamento de partículas finas das áreas de disposição para canais, bacias de controle e demais estruturas de manejo hídrico. Como consequência, ocorre a sedimentação progressiva desses materiais, com redução da seção hidráulica dos canais, diminuição do volume útil das bacias e perda gradual da capacidade de armazenamento temporário e condução das águas pluviais.

Nesse contexto, a limpeza periódica e o desassoreamento de bacias e canais devem ser compreendidos como atividades preventivas diretamente relacionadas à segurança hídrica, à confiabilidade operacional e ao controle ambiental das instalações. Boas práticas de gestão de rejeitos e resíduos industriais recomendam que sistemas de disposição contemplem rotinas estruturadas de operação, manutenção, monitoramento e vigilância, com foco no desempenho seguro ao longo do ciclo de vida das estruturas [3,4].

1.2 Importância da segurança hídrica

Além da capacidade hidráulica, a confiabilidade dessas estruturas depende da integridade dos sistemas de impermeabilização. Em bacias e canais revestidos, as geomembranas atuam como barreiras de baixa permeabilidade, reduzindo a percolação e limitando a migração de contaminantes para o solo e para as águas subterrâneas. Estudos sobre o uso de geomembranas em estruturas de contenção e disposição de rejeitos indicam que seu desempenho depende não apenas do material empregado, mas também das condições hidráulicas, climáticas, construtivas, operacionais e de manutenção [5].

Dessa forma, intervenções de limpeza em estruturas impermeabilizadas exigem cuidados adicionais. A movimentação inadequada de equipamentos, o contato direto

de ferramentas de escavação com o revestimento, o arraste de sedimentos sobre a geomembrana e a aplicação de esforços concentrados podem gerar abrasão, perfurações ou danos localizados. Assim, a eficiência da limpeza não deve ser avaliada apenas pela remoção de sedimentos, mas também pela capacidade de preservar a função de barreira do sistema impermeabilizante.

1.3 Riscos ocupacionais nas atividades de limpeza

As atividades de limpeza e remoção de sedimentos em bacias e canais podem envolver exposição de trabalhadores a áreas alagadas, saturadas, escorregadias ou com baixa capacidade de suporte. Essas condições ampliam riscos associados a quedas, atolamento, restrição de mobilidade, contato com efluentes, proximidade com equipamentos em operação e dificuldade de evacuação ou resgate.

Em atividades convencionais, parte desses riscos costuma ser controlada por procedimentos, sinalização, permissões de trabalho, equipamentos de proteção individual e acompanhamento de campo. Embora esses controles sejam necessários, eles dependem fortemente do comportamento humano e da permanência de pessoas próximas à zona crítica da atividade. A hierarquia de controles de segurança recomenda priorizar soluções que eliminem ou reduzam a exposição na origem, antes da dependência exclusiva de barreiras administrativas ou equipamentos de proteção individual [6].

Nesse sentido, a aplicação de equipamentos operados remotamente representa uma evolução no controle de riscos, pois permite afastar o operador da frente de serviço e reduzir a necessidade de presença humana direta em áreas de maior exposição. No caso de máquinas móveis aplicadas em ambientes complexos, normas e referências técnicas sobre sistemas remotos, autônomos ou semiautônomos reforçam a importância de critérios de segurança, controle do ambiente operacional, definição de zonas de trabalho, comunicação, supervisão e confiabilidade dos sistemas de comando [7,8].

1.4 Objetivos do trabalho

Este trabalho tem como objetivo apresentar a aplicação de uma escavadeira anfíbia operada remotamente na limpeza de canais impermeabilizados, avaliando sua contribuição para a segurança hídrica, a redução da exposição ocupacional e a preservação visual da geomembrana.

De forma específica, o estudo busca:

- avaliar a aplicabilidade da escavadeira anfíbia em áreas alagadas, saturadas e com restrições de acesso;
- comparar a solução remota com práticas convencionais de limpeza mecânica;
- analisar os ganhos associados à redução da exposição humana direta na frente de serviço;
- verificar, por inspeção visual, a condição aparente da geomembrana após a intervenção;

- propor indicadores de acompanhamento para atividades futuras de manutenção preventiva.

A contribuição do trabalho está em demonstrar uma aplicação prática que integra produtividade, segurança ocupacional, proteção ambiental e confiabilidade hidráulica em estruturas impermeabilizadas associadas ao manejo de águas em sistemas industriais de disposição de resíduos.

2. METODOLOGIA

2.1 Delineamento do estudo

A metodologia foi estruturada como um estudo de caso aplicado, conduzido em estruturas impermeabilizadas utilizadas no manejo de águas pluviais em uma refinaria de alumina. A avaliação considerou as condições reais de operação, os desafios associados ao acúmulo de sedimentos finos, as restrições impostas pela presença de geomembrana e os riscos ocupacionais relacionados à limpeza de áreas alagadas ou de difícil acesso.

O estudo comparou, de forma técnico-operacional, a prática convencional de limpeza mecânica com a aplicação de escavadeira anfíbia operada remotamente. A comparação foi baseada em critérios relacionados a acesso, exposição humana, controle da atividade, preservação do revestimento, produtividade relativa e recuperação da funcionalidade hidráulica das estruturas.

2.2 Caracterização das estruturas avaliadas

As estruturas avaliadas correspondem aos canais impermeabilizados destinados à condução e controle de águas pluviais que entram em contato com áreas de disposição de resíduos sólidos. Essas estruturas exercem função crítica para a segurança hídrica da operação, pois contribuem para a retenção, direcionamento e controle de vazões durante eventos de chuva.

A presença de partículas finas nas áreas de disposição favorece o carreamento de sedimentos durante precipitações intensas. Ao alcançar canais e bacias, esse material tende a se depositar, reduzindo gradualmente a capacidade de escoamento e o volume útil das estruturas. A limpeza periódica torna-se, portanto, necessária para restabelecer a condição hidráulica e evitar perda de desempenho do sistema.

As estruturas são revestidas com geomembrana, utilizada como barreira impermeabilizante. Essa característica impõe restrições importantes à manutenção, uma vez que o contato inadequado de equipamentos ou ferramentas pode comprometer o revestimento. Por esse motivo, a metodologia considerou simultaneamente a remoção dos sedimentos e a preservação visual da geomembrana, a seção aproximada pode ser vista na Figura1.

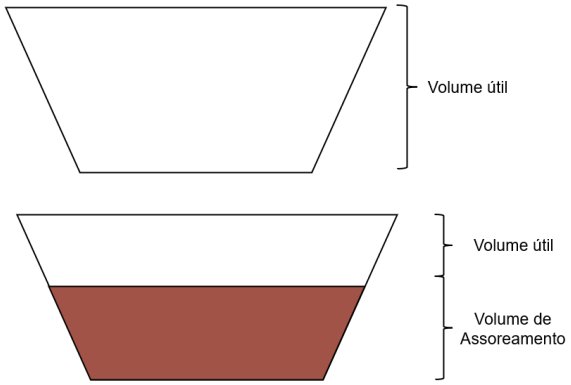


Figura 1 – Figura conceitual do assoreamento e perda de capacidade hidráulica.

2.3 Caracterização da solução aplicada

A solução avaliada consistiu na utilização de uma escavadeira anfíbia adaptada para operação em áreas com presença de lâmina d'água, sedimentos moles, baixa capacidade de suporte e restrições de acesso. A configuração anfíbia permite deslocamento e operação em condições nas quais equipamentos convencionais apresentam limitações de mobilidade, estabilidade ou alcance.

O equipamento foi empregado na remoção controlada de sedimentos acumulados sobre o revestimento dos canais. A operação foi realizada remotamente, permitindo que o operador permanecesse em área segura, fora da zona diretamente exposta aos riscos de instabilidade, contato com efluentes, atolamento, queda, restrição de mobilidade e proximidade com a frente de escavação.

Para aplicação em estruturas impermeabilizadas, foram definidos controles específicos sobre:

- profundidade máxima de escavação;
- ângulo de ação da ferramenta;
- velocidade de movimentação da lança e do implemento;
- aproximação em relação ao fundo e às laterais revestidas;
- sequência de retirada dos sedimentos;
- comunicação entre operador, equipe de campo e supervisão;
- delimitação de áreas sensíveis e zonas de exclusão.

Esses controles tiveram como objetivo evitar o contato agressivo com a geomembrana e evitar danos por abrasão, perfuração ou esforço concentrado.

2.4 Procedimento operacional de limpeza

O procedimento operacional foi iniciado com inspeção prévia das estruturas a serem limpas. Essa etapa permitiu identificar pontos de maior acúmulo de sedimentos, presença de lâmina d'água, condições de acesso, interferências operacionais, restrições de mobilidade e trechos sensíveis associados ao revestimento impermeabilizante.

Após a inspeção inicial, foram definidos os limites da frente de trabalho, o posicionamento seguro do equipamento, a sequência de limpeza e os pontos de manejo temporário dos sedimentos removidos. A área de intervenção foi organizada para restringir acessos desnecessários, reduzir a presença de pessoas próximas à frente de serviço e garantir comunicação contínua entre operador, equipe de campo e supervisão.

A limpeza foi executada de forma progressiva, com remoção controlada dos sedimentos acumulados. O avanço da atividade considerou a geometria das estruturas, a condição de visibilidade, a presença de água e a necessidade de preservar o revestimento. Sempre que necessário, a remoção foi realizada em camadas sucessivas, evitando o uso da geomembrana como superfície de apoio ou resistência para a ferramenta de escavação, conforme apresentado na Figura 2.



Figura 2 – Operação da escavadeira anfíbia.

Durante a execução, a equipe de acompanhamento verificou o comportamento do equipamento, a proximidade da ferramenta em relação à geomembrana, a condição da frente de limpeza e a necessidade de ajuste nos parâmetros operacionais. Ao final da atividade, foi realizada inspeção visual das áreas limpas, com o objetivo de verificar a remoção dos sedimentos, a recuperação da condição hidráulica aparente e a ausência de danos visíveis ao sistema de impermeabilização.

O procedimento descrito está evidenciado no diagrama apresentado na Figura 3:

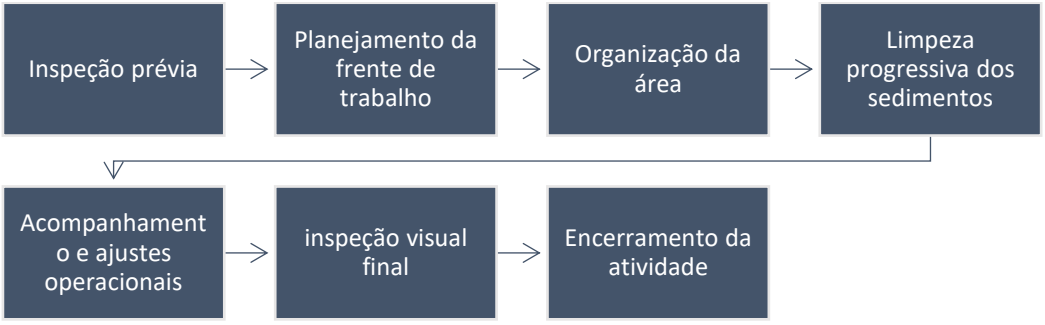


Figura 3 – Fluxograma de procedimento operacional.

2.5 Avaliação da integridade aparente da geomembrana

A preservação da geomembrana foi tratada como critério central da avaliação. Antes da execução, foram identificados trechos com maior sensibilidade operacional, regiões de maior acúmulo de sedimentos e pontos nos quais a aproximação do equipamento exigia maior controle.

Durante a atividade, foram monitorados os movimentos da lança e do implemento, evitando contato direto e agressivo com o fundo ou as laterais revestidas. Também foram consideradas restrições relacionadas ao arraste de material, à profundidade de remoção e à realização de manobras em áreas com maior risco de dano.

Após a conclusão da limpeza, a condição do revestimento foi avaliada por inspeção visual das áreas acessíveis e limpas. Essa verificação permitiu identificar possíveis danos aparentes, anomalias visíveis ou sinais de comprometimento superficial. Ressalta-se que a inspeção visual permite avaliar a integridade aparente da geomembrana, mas não substitui métodos específicos de verificação de estanqueidade ou detecção de danos não visíveis, quando exigidos pelo critério técnico da instalação.

2.6 Avaliação de segurança e redução da exposição humana

A avaliação de segurança foi baseada na análise das condições de exposição ocupacional durante a atividade. Foram considerados os riscos associados à presença de trabalhadores em áreas alagadas, saturadas, escorregadias, com sedimentos finos, baixa capacidade de suporte e restrição de mobilidade.

A operação remota foi avaliada como medida de controle voltada à redução da exposição humana direta na frente de serviço. A análise considerou os seguintes critérios:

- número de pessoas necessárias na zona crítica;
- tempo de permanência de trabalhadores próximos à frente de limpeza;
- necessidade de intervenção manual;
- distância do operador em relação à área alagada;
- comunicação entre operador e equipe de campo;
- controle de acesso à área de intervenção;
- redução da dependência de barreiras exclusivamente administrativas.

A redução da exposição humana foi interpretada à luz da hierarquia de controles, uma vez que a operação remota desloca o trabalhador da zona crítica e reduz a dependência exclusiva de procedimentos e equipamentos de proteção individual.

A execução dos serviços foi realizada de forma remota de uma cabine de controle externa conforme exposto na Figura 4.



Figura 4 – Cabine de controle de operação remota

2.7 Avaliação da eficiência operacional e da segurança hídrica

A eficiência operacional foi avaliada a partir de registros de campo e evidências comparativas antes e após a intervenção. Quando disponíveis, foram considerados indicadores como extensão limpa, área atendida, volume estimado de sedimentos removidos, tempo de execução, número de equipamentos envolvidos, necessidade de apoio manual e condição visual das estruturas.

A segurança hídrica foi analisada a partir da manutenção dos volumes admissíveis de assoreamento. A remoção dos sedimentos foi avaliada quanto à sua contribuição para aumento do volume útil, melhoria das condições de escoamento, redução de obstruções e restabelecimento da capacidade de armazenamento temporário das águas pluviais.

A documentação da atividade incluiu registros fotográficos antes, durante e após a limpeza, permitindo comparar a condição inicial das estruturas com a condição obtida após a intervenção. Esses registros auxiliaram na avaliação visual da remoção de sedimentos, da melhoria das condições de drenagem e da preservação aparente do sistema de impermeabilização. Foi utilizado também levantamentos via laser scanner para acompanhamento do volume retirado.

2.8 Comparação com o método convencional

Para fins de comparação, adotou-se como método convencional a limpeza mecanizada por escavação direta dos sedimentos acumulados, seguida de remoção, transporte e disposição do material. Essa abordagem pode ser associada à dragagem mecânica em ambiente confinado, uma vez que envolve a captura e elevação dos sedimentos por equipamentos de escavação, preservando o material em condição próxima àquela observada in situ. Apesar de sua ampla aplicação, esse método

apresenta limitações relevantes em bacias e canais impermeabilizados, sobretudo quando há sedimentos moles, lâmina d'água, acessos restritos e revestimentos sensíveis.

Nesses casos, a intervenção convencional tende a exigir maior dependência de acessos periféricos, maior aproximação da equipe de campo, maior exposição de trabalhadores a áreas alagadas ou saturadas e, em determinadas condições, a remoção integral do sistema de impermeabilização para permitir a limpeza e posterior recomposição da estrutura. Como consequência, os ativos permanecem indisponíveis durante o período de execução, recomposição e liberação operacional, reduzindo temporariamente a capacidade de controle hidráulico do sistema.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os principais critérios utilizados para comparação entre as duas abordagens.

Tabela 1 – Comparação técnico-operacional entre métodos de limpeza

Critério avaliado	**Método convencional**	**Escavadeira anfíbia com operação remota**
Exposição humana	Maior necessidade de presença na frente de serviço	Operador posicionado fora da zona crítica
Acesso à área alagada	Limitado por suporte, mobilidade e condições de acesso	Equipamento adaptado para áreas alagadas e sedimentos moles
Intervenção manual	Pode ser necessária com maior frequência	Reduzida pela mecanização e pela operação remota
Controle da ferramenta	Dependente da condição operacional e do acesso	Favorecido por controles de profundidade, ângulo e aproximação
Risco à geomembrana	Necessidade de substituição do sistema de impermeabilização	Reduzido por limitação de contato e acompanhamento da frente de limpeza
Segurança hídrica	Recuperação condicionada ao alcance e acesso disponíveis	Recuperação com maior aderência às condições alagadas
Controle de HSE	Maior dependência de procedimentos e barreiras administrativas	Redução da exposição direta na origem da atividade
Rastreabilidade	Variável conforme registros de campo	Favorecida por planejamento da frente e registros antes/depois

3.2 Eficiência operacional e recuperação da funcionalidade hidráulica

A aplicação da escavadeira anfíbia permitiu a remoção controlada dos sedimentos finos acumulados nos canais impermeabilizados. A capacidade do equipamento de operar em áreas com lâmina d'água, sedimentos moles e restrição de acesso favoreceu a continuidade da limpeza e reduziu limitações normalmente associadas ao uso de equipamentos convencionais.

Do ponto de vista operacional, a principal contribuição observada foi a recuperação da funcionalidade hidráulica das estruturas. A retirada dos sedimentos contribuiu para restabelecer condições de escoamento nos canais e ampliar o volume útil dos sistemas de armazenamento, reduzindo obstruções e pontos de acúmulo de material. Esse resultado é especialmente relevante em regiões de elevada pluviosidade, nas quais a manutenção da capacidade de armazenamento temporário e condução de águas pluviais é essencial para a segurança hídrica da planta.

A solução também apresentou maior aderência às condições reais das estruturas avaliadas. Em vez de depender exclusivamente de acessos secos, suporte adequado do terreno ou intervenções manuais em áreas saturadas, a escavadeira anfíbia permitiu atuação direta nos pontos de assoreamento. Essa característica contribuiu para melhorar a previsibilidade da limpeza e reduzir interferências associadas às condições de acesso.

Além disso, a aplicação da escavadeira anfíbia permitiu a continuidade das atividades de manutenção mesmo durante períodos de elevada pluviosidade, condição que tradicionalmente impõe restrições operacionais às intervenções convencionais. Esse aspecto contribuiu para manutenção mais contínua dos volumes disponíveis nas estruturas hidráulicas, reduzindo perdas de capacidade associadas ao avanço do assoreamento durante o período chuvoso.

A Tabela 3 apresenta uma forma recomendada de consolidação dos resultados operacionais. Os campos podem ser preenchidos com valores normalizados, preservando informações sensíveis da operação.

Tabela 3 – Síntese dos resultados operacionais

Indicador	Resultado observado
Tempo de execução	4 meses
Sedimentos removidos	43.000 m³
Necessidade de apoio manual	Apenas para manutenções preventivas do equipamento

3.3 Ganhos em HSE e redução da exposição humana

Sob a perspectiva de HSE, o principal ganho observado foi a redução da exposição humana direta em áreas alagadas, instáveis ou de difícil acesso. Na limpeza convencional, parte das atividades pode exigir maior proximidade de trabalhadores com a frente de serviço, inclusive em locais com presença de lâmina d'água, sedimentos finos, baixa capacidade de suporte e restrição de mobilidade.

Com a operação remota da escavadeira anfíbia, o operador pôde permanecer em área segura, afastado da zona crítica da intervenção. Essa configuração reduziu a necessidade de presença humana direta no interior ou nas proximidades imediatas das estruturas em limpeza. A tecnologia, portanto, atuou como medida de controle mais robusta do que barreiras exclusivamente administrativas, pois reduziu a exposição na origem da atividade.

Além da proteção do operador, a mecanização remota contribuiu para reduzir a necessidade de apoio manual na frente de limpeza. A equipe de campo permaneceu voltada principalmente ao acompanhamento, orientação, comunicação e verificação das condições operacionais, sem atuação contínua em áreas de maior risco. Esse aspecto representa avanço importante na gestão de segurança, pois reduz a permanência de trabalhadores em zonas com baixa estabilidade, mobilidade restrita e dificuldade de resgate.

A Tabela 4 apresenta os ganhos de HSE de forma objetiva.

Tabela 4 – Indicadores sugeridos para avaliação de HSE

Critério	**Método convencional**	**Operação remota com escavadeira anfíbia**	**Ganho esperado**
Operador na zona crítica	Sim ou parcialmente exposto	Não exposto diretamente	Redução da exposição direta
Trabalhadores próximos à frente de serviço	Maior necessidade	Menor necessidade	Redução de pessoas em área crítica
Apoio manual em área alagada	Mais frequente	Reduzido	Menor tempo de permanência em risco
Risco de atolamento/queda	Mais associado ao acesso direto	Reduzido pela distância operacional	Melhor controle de HSE
Dependência de barreiras administrativas	Maior	Menor	Controle mais próximo da fonte do risco
Comunicação e supervisão	Necessária	Necessária e estruturada	Aumento do controle da atividade

3.4 Preservação visual da geomembrana

A preservação do sistema de impermeabilização foi um dos critérios centrais da aplicação. Durante a limpeza, foram adotados controles voltados à limitação da profundidade de escavação, ao controle do ângulo de ação do implemento, à redução de movimentos bruscos e à prevenção de contato agressivo com o revestimento.

Após a intervenção, a inspeção visual das áreas acessíveis não identificou danos aparentes à geomembrana. Esse resultado indica que, nas condições avaliadas, a limpeza pôde ser realizada sem comprometimento visual do revestimento.

A manutenção da integridade da geomembrana é fundamental para a confiabilidade ambiental do sistema, pois o revestimento atua como barreira de baixa permeabilidade. Assim, a eficiência da limpeza não deve ser medida apenas pela quantidade de sedimento removido, mas também pela capacidade de executar a intervenção preservando a função de barreira das estruturas impermeabilizadas.

A Tabela 5 apresenta os principais controles aplicados para proteção da geomembrana.

Tabela 5 – Controles adotados para preservação da geomembrana

Etapa	Controle aplicado	Finalidade
Planejamento	Inspeção prévia das áreas sensíveis	Identificar pontos de maior risco ao revestimento
Posicionamento	Definição de limites da frente de trabalho	Evitar aproximação inadequada do equipamento
Execução	Limitação de profundidade e controle do ângulo de ataque	Reduzir risco de contato agressivo com a geomembrana
Remoção de sedimentos	Limpeza progressiva em camadas	Evitar esforços concentrados e arraste excessivo
Acompanhamento	Verificação visual da frente de limpeza	Ajustar a operação durante a execução
Pós-atividade	Inspeção visual das áreas limpas	Confirmar ausência de danos aparentes

3.5 Previsibilidade e rastreabilidade da manutenção

Além dos ganhos operacionais e de segurança, a aplicação da escavadeira anfíbia com operação remota contribuiu para melhorar a gestão das atividades de manutenção nos canais impermeabilizados. A maior adaptação do equipamento às condições alagadas favoreceu o planejamento das intervenções, reduzindo incertezas relacionadas ao acesso, à mobilização de recursos e à necessidade de apoio manual.

A atividade passou a ser conduzida com maior previsibilidade, uma vez que a solução permite programar frentes de limpeza considerando a condição de assoreamento, a criticidade hidráulica da estrutura e a disponibilidade operacional da planta. Esse aspecto é relevante para a gestão preventiva, pois permite antecipar intervenções

antes que o acúmulo de sedimentos comprometa de forma significativa a capacidade de armazenamento da seção hidráulica dos canais.

A rastreabilidade também foi aprimorada por meio do acompanhamento das frentes de serviço, dos registros fotográficos antes e após a intervenção e da delimitação das áreas limpas. Esses registros permitem documentar a condição inicial das estruturas, a evolução da limpeza e a condição final após a remoção dos sedimentos. Quando associados a indicadores operacionais, podem compor uma base de dados para definição de frequência de limpeza, priorização de áreas críticas e melhoria contínua dos planos de manutenção preventiva.

Dessa forma, a limpeza deixa de ser tratada apenas como resposta corretiva ao assoreamento e passa a integrar um processo sistemático de gestão da funcionalidade hidráulica e da integridade ambiental das estruturas impermeabilizadas.

3.6 Síntese dos ganhos observados

A Tabela 6 consolida os principais ganhos associados à aplicação da escavadeira anfíbia operada remotamente.

Tabela 6 – Síntese dos ganhos e contribuições da solução aplicada

Dimensão avaliada	Resultado observado	Contribuição para o sistema
Eficiência operacional	Remoção controlada dos sedimentos em áreas alagadas e de difícil acesso	Manutenção da capacidade hidráulica das estruturas
Segurança hídrica	Melhoria das condições de escoamento e armazenamento temporário	Maior confiabilidade durante eventos de chuva
Integridade da geomembrana	Ausência de danos aparentes nas áreas inspecionadas após a limpeza	Preservação da função de barreira impermeabilizante
HSE	Redução da exposição humana direta à frente de serviço	Menor risco ocupacional em áreas alagadas ou instáveis
Gestão da manutenção	Melhor acompanhamento das frentes de limpeza e registros antes e após a intervenção	Maior previsibilidade e rastreabilidade das ações preventivas
Continuidade operacional em período chuvoso	Possibilidade de manutenção durante condições de elevada pluviosidade	Preservação dos volumes hidráulicos e redução do avanço do assoreamento

Os resultados indicam que a principal contribuição da tecnologia não está apenas na mecanização da limpeza, mas na combinação entre eficiência operacional, redução

de exposição humana e proteção das estruturas impermeabilizadas. Essa integração reforça o potencial da solução como prática de manutenção preventiva voltada à segurança hídrica, ao controle ambiental e ao fortalecimento das práticas de HSE em sistemas industriais de disposição de resíduos.

4. CONCLUSÕES

A aplicação de escavadeira anfíbia operada remotamente apresentou potencial técnico para a limpeza dos canais impermeabilizados sujeitos ao acúmulo de sedimentos finos, presença de lâmina d'água e restrições de acesso. A solução favoreceu a remoção controlada de sedimentos e contribuiu para a recuperação da funcionalidade hidráulica das estruturas avaliadas, aspecto relevante para a segurança hídrica em ambientes industriais submetidos a elevada pluviosidade.

Sob a perspectiva de HSE, a principal contribuição foi a redução da exposição humana direta à frente de serviço. A possibilidade de manter o operador em área segura e reduzir a necessidade de apoio manual em zonas alagadas representa avanço em relação a métodos convencionais mais dependentes da presença de trabalhadores próximos à área crítica. A operação remota, portanto, atua como medida de controle mais robusta, por reduzir a exposição na origem da atividade

Em relação ao sistema de impermeabilização, a inspeção visual realizada após a limpeza não identificou danos aparentes à geomembrana nas áreas avaliadas. Esse resultado reforça a viabilidade da tecnologia para manutenção de estruturas revestidas, desde que associada a controles operacionais específicos, como limitação de profundidade, controle de movimentos, acompanhamento da frente de serviço e inspeção pós-atividade.

Como limitação, destaca-se que a avaliação da geomembrana foi baseada em inspeção visual, não substituindo métodos específicos de detecção de danos ou verificação de estanqueidade quando aplicáveis. Além disso, recomenda-se que aplicações futuras consolidem indicadores normalizados de produtividade, exposição ocupacional, frequência de limpeza, volume relativo de sedimentos removidos e condição hidráulica das estruturas antes e após a intervenção. Conclui-se que a operação remota com escavadeira anfíbia constitui uma alternativa tecnicamente adequada para manutenção preventiva de estruturas impermeabilizadas, integrando eficiência operacional, segurança hídrica, proteção ambiental e redução de riscos ocupacionais.

5. PALAVRAS-CHAVE

Estruturas impermeabilizadas; Limpeza de sedimentos; Escavadeira anfíbia; Gestão de riscos; Segurança hídrica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current

management, disposal and storage practices. Hydrometallurgy, v. 108, n. 1–2, p. 33–45, 2011.

[2] INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. Bauxite Residue Management: Best Practice. London: International Aluminium Institute, 2015.

[3] GLOBAL TAILINGS REVIEW. Global Industry Standard on Tailings Management. London: Global Tailings Review, 2020.

[4] MINING ASSOCIATION OF CANADA. Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities: OMS Guide, Version 2.1. Ottawa: Mining Association of Canada, 2021.

[5] TUOMELA, A.; RONKANEN, A.-K.; ROSSI, P. M.; MARTTILA, H.; KLØVE, B. Using geomembrane liners to reduce seepage through the base of tailings ponds: a review and a framework for design guidelines. Geosciences, v. 11, n. 2, art. 93, 2021.

[6] NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. Hierarchy of Controls. Washington, DC: Centers for Disease Control and Prevention, 2024.

[7] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 17757:2019: Earth-moving machinery and mining — Autonomous and semi-autonomous machine system safety. Geneva: ISO, 2019.

[8] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15817:2012: Earth-moving machinery — Remote operator control systems — Safety requirements. Geneva: ISO, 2012.

[9] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Stormwater Wet Pond and Wetland Management Guidebook. Washington, DC: U.S. EPA, 2009.



Giselle LOPES

Engenheira Civil com especialização em Geotecnia, atua na gestão da segurança hídrica de depósitos de resíduos sólidos e no manejo de resíduos e efluentes industriais. Responsável pela fiscalização de dragagens e pelo atendimento a requisitos legais, contribui para a integridade ambiental e a conformidade operacional da empresa.

	**Kelson FONSECA** Engenheiro Civil com especialização em geotecnia e inspeção de obras e qualidade na construção civil, responsável por Inspeções de segurança de depósitos de resíduos e estruturas de solo compactados, fiscalização de monotoramento das leituras de instrumentações geotécnicas, fiscalização de diversas manutenções civil em depósitos de resíduos e estruturas de solos e experiência em processo produtivo de refino de Bauxita.
	**Reginaldo ÁLVARES JR** Engenheiro Civil, especialista em Geotecnia, com experiência em manutenção de infraestrutura de mineração, otimização de processos de disposição de rejeitos e melhoria da eficiência operacional. Atuação em projetos de inovação para a indústria de alumínio, com foco em sustentabilidade, segurança hídrica e redução de consumo energético.
	**Claudionor PINHO** Engenheiro de Minas, pós-graduado em gestão de projetos e ESG, com mais de 20 anos de experiência na área de mineração, otimização de processos e eficiência operacional. Atuando na infraestrutura de mineração. Foco na gestão de pessoas, sustentabilidade. Gestão do Opex e Capex.
	**Leonardo BRAGA** Gerente Sênior na Norsk Hydro | Engenheiro Mecânico com MBA pela FGV - Fundação Getulio Vargas e especializações em Gestão de Ativos e Tecnologia Mineral. Mais de 20 anos de experiência em operação, manutenção e gestão industrial na Hydro, Vale e MRN, liderando grandes equipes, projetos estratégicos, segurança operacional e iniciativas de alta performance na mineração e indústria de alumina.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.2
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

PICNÔMETRO A GÁS E PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE COMO ENSAIOS DE OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COMPACTAÇÃO DE REJEITO FILTRADO EM UMA MINA DO QUADRILATERO FERRIFERO

Victor BRETAS
Gerente Técnico - VALE

Pedro CORREA
Engenheiro Geotécnico - CHAMMAS

Markus DIAS
Engenheiro Geotécnico - BVP

Mateus VIANA
Engenheiro Geotécnico - BVP

Alfredo NUNES
Engenheiro Geotécnico - BVP

RESUMO

A eficiência no controle tecnológico das camadas de rejeito filtrado compactado na Mina do estudo tem demandado ferramentas capazes de reduzir incertezas e acelerar o processo de liberação operacional. Nesse contexto, a aplicação do picnômetro a gás e do penetrômetro dinâmico leve (PDL) mostrou-se estratégica para otimizar o ciclo de compactação. O picnômetro a gás reduziu o tempo de obtenção da densidade esquelética real de cerca de 36 horas para aproximadamente 30 minutos, mantendo elevada concordância com o método convencional por picnômetro de vidro. Já o PDL permitiu substituir avaliações subjetivas de camadas com comportamento “borrachudo” por critérios quantitativos, baseados no número de golpes para cravação de 30 cm. Ensaios realizados em camadas de 30 cm com diferentes proporções granulares possibilitaram classificar o material conforme seu comportamento deformacional: menos de 40 golpes indicaram condição “borrachuda”, entre 41 e 50 golpes caracterizaram condição intermediária e valores superiores a 50 golpes foram associados a camadas adequadas ao empilhamento. Os resultados demonstram que a combinação dessas duas técnicas reduz retrabalhos, aumenta a confiabilidade dos parâmetros de controle e aprimora a tomada de decisão no processo de compactação do rejeito filtrado.

Palavras-chave: Rejeito Filtrado; Penetrômetro Dinâmico Leve; Picnometria a Gás.

ABSTRACT

The efficiency of technological control in compacted filtered tailings layers at the studied mine has required tools capable of reducing uncertainties and accelerating the operational release process. In this context, the application of the gas pycnometer and the Light Dynamic Penetrometer (LDP) proved strategic for optimizing the compaction cycle. The gas pycnometer reduced the time required to determine the real skeletal density from approximately 36 hours to about 30 minutes while maintaining strong agreement with the conventional glass pycnometer method. In parallel, the LDP enabled the replacement of subjective evaluations of layers presenting "pumping" behavior with quantitative criteria based on the number of blows required for 30 cm penetration. Tests performed on 30 cm thick layers with different granular proportions allowed the material to be classified according to its deformational behavior: fewer than 40 blows indicated pumping conditions, values between 41 and 50 blows characterized intermediate conditions, and results above 50 blows were associated with layers suitable for stacking. The results demonstrate that the combined use of these two techniques reduces rework, increases the reliability of control parameters, and improves decision-making in the filtered tailings compaction process.

Keywords: Filtered Tailings; Dynamic Penetrometer; Gas Pycnometer.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a gestão de rejeitos na indústria minerária global passou por uma profunda quebra de paradigma. O declínio do uso de barragens de empacamento hidráulico convencional, impulsionado por exigências regulatórias rigorosas e pela busca de maior segurança operacional, consolidou o empilhamento de rejeitos filtrados e compactados (dry stacking) como uma das principais alternativas tecnológicas para o setor [1,2]. Essa metodologia reduz drasticamente o consumo de água e os riscos de liquefação, resultando em estruturas mecanicamente mais estáveis.

No entanto, a transição para o empilhamento a seco impõe desafios severos ao controle de qualidade no campo (Quality Control / Quality Assurance - QC/QA). A variabilidade mineralógica e granulométrica inerente aos rejeitos de minério de ferro exige um monitoramento ágil e preciso dos parâmetros de compactação, como o grau de compactação (GC) e o teor de umidade ótima (w_{ot}). Métodos convencionais de caracterização, como o ensaio de picnometria a gás de hélio em substituição ao picnômetro de vidro (conforme normas como a ASTM D5550 [7]), e o uso de ensaios de penetração dinâmica leve (PDL) têm surgido na literatura geotécnica como soluções promissoras para superar o gargalo do tempo de resposta dos ensaios laboratoriais tradicionais [3].

A agilidade na tomada de decisão é crítica para evitar fenômenos de supercompactação ou o surgimento do comportamento "borrachudo" (saturação por excesso de poropressão sob cargas dinâmicas), que comprometem a trafegabilidade de equipamentos e a estabilidade das bermas. Diante desse cenário, o presente

trabalho contextualiza a aplicação integrada dessas ferramentas tecnológicas na Mina do estudo.

A determinação precisa da densidade esquelética real dos sólidos (ou gravidade específica, Gs) é um dos pilares mais críticos nas equações de relações de fases da geotecnia. Na mineração de ferro moderna, onde as taxas de empilhamento de rejeitos filtrados exigem respostas em tempo real para evitar gargalos operacionais, o método tradicional por picnômetro de água e balão volumétrico (normatizado pela ABNT NBR 6458 [14]) tem se mostrado disfuncional devido ao longo tempo de equilíbrio térmico e remoção do ar preso por fervura. Centros de excelência em engenharia civil e de minas, como o *Imperial College London* e a *University of Western Australia (UWA)*, têm apontado que a lentidão desse processo laboratorial compromete o cálculo imediato do índice de vazios em campo, retardando as vistorias de estabilidade de estruturas de grande porte.

Para mitigar essa limitação, a introdução da picnometria a gás tem sido amplamente respaldada pela academia e adotada por grandes corporações globais como a Rio Tinto e a BHP. Este método encontra amparo normativo estrito na ASTM D5550 [7] (*Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer)* e ABNT NBR ISO 12154 [8] (Determinação da densidade por deslocamento volumétrico – Densidade-esqueleto por picnometria a gás). O princípio de funcionamento baseia-se na Lei de *Boyle-Mariotte*, medindo a queda de pressão de um gás inerte (comumente o hélio) quando expandido de uma célula de referência conhecida para a câmara que acomoda a amostra. Como o hélio possui dimensões moleculares extremamente reduzidas, ele é capaz de penetrar até mesmo nos poros microscópicos e fraturas intragranulares mais imperceptíveis das partículas de minério, garantindo uma medição volumétrica mais representativa do esqueleto mineral e livre de interferências de dissolução química comuns na água.

Estudos geotécnicos avançados publicados em periódicos como a *Canadian Geotechnical Journal* demonstram que, ao dispensar as etapas de saturação líquida prolongada, o tempo total de ensaio cai drasticamente de dezenas de horas para menos de uma hora. Além da drástica aceleração temporal, as pesquisas validam a robustez estatística do ensaio, evidenciando uma elevadíssima concordância empírica e reprodutibilidade de dados em comparação aos ensaios por via úmida. Essa agilidade remove o atraso metodológico histórico nas rotinas de laboratório de campo, permitindo que os engenheiros monitorem variações mineralógicas repentinas no rejeito — as quais alteram a densidade real e, por consequência, o Grau de Compactação de projeto — com a precisão matemática exigida por agências reguladoras internacionais.

Paralelamente, o controle de rigidez e trafegabilidade das camadas depositadas no empilhamento a seco demanda ensaios in situ rápidos que superem a esparsidade espacial de testes destrutivos como o frasco de areia. O uso do Penetrômetro Dinâmico Leve (PDL), derivado do *Lightweight Dynamic Cone Penetrometer (LDCP),* tem sido extensivamente pesquisado por universidades de ponta, como a *Purdue* University e a *University of British Columbia (UBC),* para avaliar a resistência mecânica contínua de camadas compactadas de solo e rejeitos siltosos. O equipamento atua por meio do cravamento dinâmico de uma ponteira cônica sob energia controlada e constante, correlacionando o número de golpes necessários para

penetrar uma espessura padronizada de solo com os parâmetros de deformabilidade e cisalhamento do maciço.

A grande inovação do PDL reside na substituição de critérios qualitativos e puramente empíricos por métricas numéricas rigorosas e rastreáveis na liberação de frentes operacionais. Na prática minerária, o surgimento do comportamento "borrachudo" (também conhecido na literatura em inglês como *pumping effect*) ocorre quando o material é compactado com teor de umidade excessivamente elevado, acima do ótimo Proctor. Sob o tráfego de caminhões fora de estrada ou a energia repetida dos rolos compactadores, a indução de tensões cíclicas gera uma poropressão positiva que não se dissipa imediatamente devido à baixa permeabilidade do rejeito fino, reduzindo a tensão efetiva a zero e fazendo a camada deformar elasticamente de forma plástica e instável.

Modelos numéricos de compactação desenvolvidos pela *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (ISSMGE) comprovam que o PDL é altamente sensível a esse estado de amolecimento do solo. Quando a ponta cônica encontra uma camada saturada ou semi-saturada propensa ao comportamento resiliente destrutivo, a resistência de ponta (qd) cai abruptamente, resultando em contagens de golpes anormalmente baixas para a profundidade avaliada. Ao mapear o número exato de golpes necessários para a cravação de 30 cm, as equipes de engenharia conseguem estabelecer limiares matemáticos exatos que segregam camadas perfeitamente densificadas e estáveis daquelas que demandam escarificação, secagem e recompactação imediata.

A integração de ambas as ferramentas tecnológicas representa o estado da arte em termos de *Quality Control / Quality Assurance (QC/QA*) para o gerenciamento de rejeitos industriais. Ao acoplar a precisão física e a rapidez analítica do picnômetro a gás com o diagnóstico geomecânico instantâneo fornecido pelo penetrômetro dinâmico leve, as mineradoras conseguem reduzir incertezas operacionais que caracterizavam os métodos convencionais. A tomada de decisão no campo deixa de ser reativa, mitigando o risco de aprisionamento de água no interior do empilhamento e prevenindo potenciais falhas de estabilidade física nas bermas perimetrais.

Em suma, as evidências colhidas nas investigações científicas de mineradoras globais e laboratórios acadêmicos de geotecnia reforçam que a transição para a instrumentação digital e expedita de campo é o caminho definitivo para a segurança do setor. A otimização do ciclo de compactação reduz os custos atrelados a retrabalhos e paradas de equipamentos na pista, garantindo uma infraestrutura de rejeitos mecanicamente homogênea. Dessa forma, a validação técnica dessas metodologias em operações complexas chancela o avanço da engenharia em direção a uma mineração mais previsível, sustentável e fundamentada em dados quantitativos de alta fidelidade.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação do picnômetro a gás e do penetrômetro dinâmico leve (PDL) como ferramentas de otimização do controle tecnológico das camadas de rejeito filtrado compactado na Mina do estudo, visando

aumentar a agilidade, a confiabilidade e a assertividade do processo de liberação operacional durante o empilhamento.

Busca-se analisar a utilização do picnômetro a gás como alternativa ao método convencional de determinação da densidade real dos sólidos utilizando o balão volumétrico de vidro e bomba de vácuo, verificando sua aplicabilidade na redução do tempo de obtenção do parâmetro Gs, bem como sua influência na determinação do índice de vazios e no controle do grau de compactação das camadas executadas.

Adicionalmente, o trabalho objetiva avaliar a aplicação do penetrômetro dinâmico leve (PDL) como ferramenta quantitativa para identificação de camadas com comportamento “borrachudo”, reduzindo a subjetividade associada às avaliações visuais tradicionalmente empregadas em campo. Para isso, busca-se correlacionar os resultados do PDL com o comportamento deformacional das camadas compactadas, estabelecendo critérios de classificação capazes de auxiliar na tomada de decisão quanto à aprovação, retrabalho ou recompactação das frentes de empilhamento.

3. METODOLOGIA

Para avaliação da aplicabilidade do picnômetro a gás e do penetrômetro dinâmico leve (PDL) no controle tecnológico do empilhamento de rejeito filtrado da Mina do estudo, foram realizados ensaios laboratoriais e verificações de campo em condições operacionais reais. A metodologia adotada contemplou a caracterização do rejeito filtrado, a determinação da densidade esquelética dos sólidos por meio de picnometria a gás, conforme os princípios estabelecidos pela ABNT NBR ISO 12154 [8] e pela ASTM D5550 [7], além da avaliação geomecânica das camadas compactadas utilizando o penetrômetro dinâmico leve (PDL), executado conforme as diretrizes da ISO 22476-2:2005 [15]. Os resultados obtidos foram correlacionados com parâmetros de deformabilidade, trafegabilidade e desempenho operacional das frentes de empilhamento de rejeito filtrado.

3.1. Caracterização do Rejeito

O material avaliado neste estudo consiste em rejeito filtrado parcial de minério de ferro proveniente da Mina do estudo, localizada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. O rejeito é destinado ao empilhamento drenado e compactado (*dry stacking*), sendo submetido a controle tecnológico contínuo durante a execução das camadas operacionais de disposição.

O rejeito apresenta predominância de comportamento arenoso, com controle granulométrico operacional realizado de forma a manter proporções adequadas entre fração granular e teor de finos, visando garantir condições satisfatórias de compactação, resistência mecânica e trafegabilidade das camadas compactadas. Durante as campanhas avaliadas, foram analisadas camadas compostas por relações granulométricas variando entre 90/10 e 80/20 entre fração granular e finos, respectivamente.

As camadas foram executadas com espessura aproximada de 30 cm após compactação e submetidas a controle tecnológico laboratorial e de campo,

contemplando a determinação da densidade esquelética dos sólidos, curva granulométrica, umidade, permeabilidade, avaliação das condições de compactação e verificação do comportamento geomecânico do material compactado. O acompanhamento operacional incluiu análises relacionadas à deformabilidade, exsudação e ocorrência de comportamento “borrachudo”, caracterizado pela elevada deformabilidade da camada sob carregamentos cíclicos provenientes do tráfego de equipamentos e da energia de compactação.

A caracterização e o controle tecnológico do rejeito foram realizados por meio de ensaios laboratoriais e verificações expedidas de campo, utilizando-se a determinação da densidade esquelética dos sólidos por picnometria a gás, conforme os princípios estabelecidos pela ABNT NBR ISO 12154 [8] e pela ASTM D5550 [7], além da avaliação da resistência mecânica das camadas compactadas por meio do Penetrômetro Dinâmico Leve (PDL), executado conforme as diretrizes da ISO 22476-2:2005 [15]. Os resultados obtidos foram correlacionados com observações operacionais de campo e ensaios complementares de deformabilidade e CPTu, utilizados como suporte para classificação e liberação das camadas compactadas.

3.2. Determinação da densidade esquelética por picnômetro a gás

A determinação da densidade esquelética real dos sólidos do rejeito filtrado foi realizada utilizando picnômetro a gás, conforme os princípios estabelecidos pela ABNT NBR ISO 12154 [8] e pela ASTM D5550 [7]. O método foi adotado como alternativa ao procedimento convencional realizado com picnômetro de vidro, visando reduzir o tempo necessário para obtenção dos parâmetros empregados no controle tecnológico das camadas compactadas.

O princípio de funcionamento do equipamento baseia-se na expansão de um gás em câmaras de volumes conhecidos e na relação entre pressão e volume descrita pela Lei de Boyle-Mariotte e pela Lei dos Gases Ideais [4]. O sistema é composto por duas câmaras interligadas, sendo uma destinada ao acondicionamento da amostra e outra utilizada para pressurização do sistema. Após a estabilização da pressão inicial, o gás é expandido entre os compartimentos internos, permitindo determinar o volume efetivamente ocupado pelos sólidos da amostra a partir da variação de pressão observada no sistema.

A picnometria a gás é amplamente empregada para determinação da densidade real de materiais particulados devido à elevada precisão e repetibilidade dos resultados obtidos. Segundo [5], a utilização de gases inertes como hélio ou nitrogênio permite minimizar interferências associadas à tensão superficial e ao aprisionamento de ar presentes nos métodos convencionais por via úmida. Além disso, [6] destaca que o uso de hélio proporciona maior capacidade de penetração em micro vazios e descontinuidades internas das partículas, favorecendo medições mais representativas do volume sólido real.

Além disso, para o rejeito filtrado avaliado neste estudo, os valores obtidos de densidade esquelética por picnometria a gás podem ser considerados equivalentes aos valores tradicionalmente empregados para o parâmetro Gs (densidade real dos grãos) em mecânica dos solos. Isso ocorre porque a picnometria a gás determina

exclusivamente o volume efetivamente ocupado pela fase sólida das partículas, desconsiderando vazios permeáveis acessíveis ao fluido de medição, resultando em valores representativos da densidade real do material particulado [5].

Segundo a [7] e a [8], a metodologia de picnometria a gás é amplamente utilizada para determinação da densidade real de sólidos finamente divididos, apresentando elevada precisão e repetibilidade quando aplicada a materiais granulares e pulverulentos. Para rejeitos filtrados de minério de ferro, compostos predominantemente por partículas minerais de baixa porosidade intrapartícula, a densidade esquelética obtida pelo ensaio apresenta comportamento equivalente ao parâmetro Gs convencionalmente utilizado nos cálculos de índice de vazios, grau de compactação e demais relações volumétricas aplicadas ao controle geotécnico.

De acordo com [4], a utilização da picnometria a gás reduz significativamente limitações observadas em métodos convencionais, como dissolução parcial do material, dificuldade de saturação e retenção de bolhas de ar no interior da amostra. Essas características tornam o método particularmente adequado para materiais finamente particulados e com elevada heterogeneidade granulométrica, como rejeitos filtrados de minério de ferro.

No presente estudo, o emprego do picnômetro a gás teve como principal objetivo aumentar a agilidade do processo de liberação operacional das camadas de rejeito filtrado compactado. Enquanto o método convencional por picnômetro de vidro demandava aproximadamente 36 horas para estabilização e conclusão do ensaio, a metodologia por picnometria a gás permitiu a obtenção dos resultados em aproximadamente 30 minutos.

Essa redução no tempo de resposta laboratorial possui elevada relevância operacional, uma vez que a aprovação das camadas compactadas é realizada com base na validação de parâmetros como índice de vazios e grau de saturação, diretamente dependentes da determinação da densidade esquelética real dos sólidos (Gs). Dessa forma, a redução do tempo de obtenção desse parâmetro impacta diretamente no tempo em que as frentes de empilhamento permanecem paralisadas aguardando resultados laboratoriais, contribuindo para maior agilidade na liberação operacional das camadas e redução de atrasos associados ao ciclo de compactação.

Para validação da metodologia aplicada ao rejeito filtrado da Mina do estudo, os resultados obtidos por meio do picnômetro a gás foram comparados aos resultados provenientes da técnica convencional, utilizando balão volumétrico e bomba de vácuo. A análise demonstrou elevada concordância entre os métodos, sem diferenças significativas para os valores de índice de vazios calculados. O resíduo absoluto máximo observado foi de 0,0232, valor considerado compatível com as tolerâncias esperadas para esse tipo de ensaio e adequado para aplicação em rotinas de controle tecnológico operacional.

Além da significativa redução do tempo de resposta laboratorial, a adoção da picnometria a gás contribuiu para maior confiabilidade na determinação dos parâmetros de compactação, redução de retrabalhos associados à variabilidade do Gs e maior agilidade na tomada de decisão para liberação das frentes de empilhamento de rejeito filtrado.

3.3. Avaliação geomecânica por Penetrômetro Dinâmico Leve (PDL)

A avaliação das condições geomecânicas das camadas compactadas de rejeito filtrado foi realizada utilizando o Penetrômetro Dinâmico Leve (PDL), executado conforme as diretrizes da ISO 22476-2:2005 [15]. O ensaio foi empregado como ferramenta expedita de campo para avaliação da resistência mecânica, deformabilidade e identificação de camadas com comportamento excessivamente deformável, associadas operacionalmente ao fenômeno conhecido como “borrachudo”.

O Penetrômetro Dinâmico Leve consiste em um ensaio de penetração dinâmica baseado na cravação de uma ponteira metálica no terreno por meio da aplicação sucessiva de impactos de energia conhecida. Segundo [9], o método caracteriza-se pela simplicidade operacional, rapidez de execução e elevada aplicabilidade em investigações geotécnicas expedidas.

O equipamento utilizado neste estudo possui características compatíveis ao modelo tipo LRS 10, amplamente empregado em investigações geotécnicas de campo, sendo constituído por conjunto de hastes metálicas e ponteira cônica com seção padronizada. O sistema utiliza massa de impacto de 10 kg com altura de queda de 0,50 m, registrando-se o número de golpes necessários para penetração de segmentos sucessivos do material compactado.

O princípio do ensaio baseia-se na relação entre a energia necessária para cravação da ponteira e a resistência oferecida pelo material penetrado. Conforme descrito por [10] e [9], os resultados do PDL apresentam correlação com parâmetros geotécnicos como resistência ao cisalhamento, capacidade de suporte e deformabilidade, sendo amplamente utilizados em avaliações expedidas de materiais compactados e solos de baixa consistência.

No presente estudo, o PDL foi aplicado como ferramenta complementar ao controle tecnológico das camadas de rejeito filtrado compactado, visando reduzir a subjetividade associada à avaliação visual e operacional das condições de trafegabilidade e deformabilidade das frentes de empilhamento. A metodologia foi utilizada principalmente na identificação de camadas suscetíveis à ocorrência de comportamento “borrachudo”, caracterizado pela elevada deformação superficial sob carregamentos cíclicos provenientes da compactação e circulação de equipamentos.

Os resultados obtidos em campo foram correlacionados com observações operacionais, presença de exsudação superficial e ensaios complementares de CPTu realizados nas áreas avaliadas. A partir das campanhas executadas, foram estabelecidos critérios quantitativos preliminares para classificação das condições das camadas compactadas, utilizando-se o número de golpes obtidos no PDL como parâmetro indicativo de desempenho geomecânico e trafegabilidade operacional.

As avaliações realizadas indicaram tendência de comportamento deformável para valores inferiores a 40 golpes, comportamento intermediário entre 41 e 50 golpes e condições satisfatórias de compactação e suporte para valores superiores a 50 golpes. Esses critérios permitiram maior padronização na tomada de decisão operacional quanto à liberação, recompactação ou retrabalho das camadas executadas, reduzindo significativamente a subjetividade das avaliações de campo.

4. RESULTADOS

4.1. Aplicação do picnômetro a gás

Os resultados obtidos a partir da comparação entre a metodologia de picnometria a gás e o método convencional utilizando balão volumétrico com bomba de vácuo demonstraram elevada concordância entre os valores determinados para o rejeito filtrado arenoso da Mina do estudo. A análise estatística indicou forte correlação entre os valores de densidade esquelética dos sólidos (Gs) obtidos pelos dois métodos, apresentando coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9697, evidenciando elevada aderência entre as metodologias avaliadas.

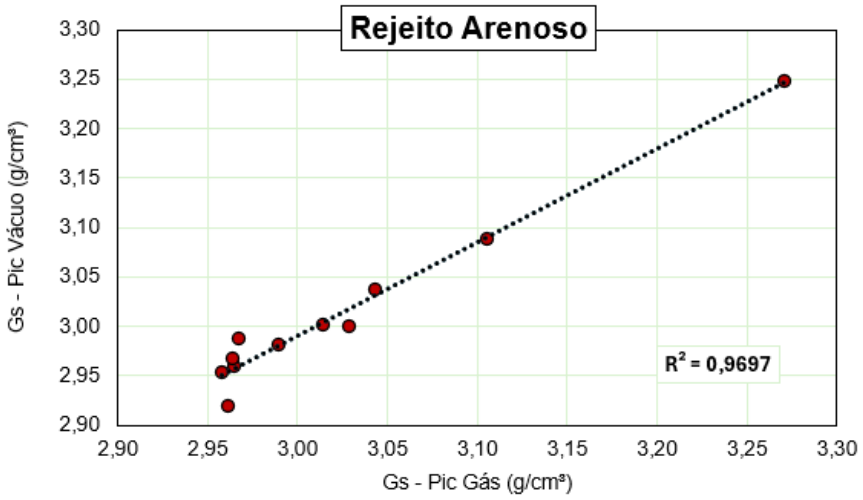


Figura 1 – Correlação entre os valores de Gs determinados por picnometria a gás e pelo método convencional utilizando balão volumétrico com bomba de vácuo.

Os valores de Gs obtidos variaram entre 2,961 g/cm³ e 3,126 g/cm³, comportamento compatível com materiais provenientes do beneficiamento de minério de ferro com predominância de partículas quartzosas e hematíticas. Os índices de vazios calculados a partir dos valores obtidos apresentaram variação entre 0,484 e 0,761, refletindo diferentes condições de compactação e densificação observadas nas camadas avaliadas.

Tabela 1 – Faixas de valores obtidos para o rejeito arenoso

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
Gs – Método convencional balão volumétrico (g/cm³)	2,961	3,126
Massa específica seca (g/cm³)	1,764	2,083
Índice de vazios (e)	0,484	0,761

A análise dos resíduos absolutos demonstrou baixa dispersão entre os métodos comparados. O maior resíduo absoluto observado para os valores de Gs foi de 0,041,

enquanto para os índices de vazios o valor máximo observado foi de 0,023. Esses resultados permanecem compatíveis com as tolerâncias normalmente aceitas para ensaios geotécnicos aplicados ao controle tecnológico de materiais compactados, indicando adequada repetibilidade e precisão da metodologia por picnometria a gás.

Os resultados obtidos corroboram o comportamento descrito por [5], que destacam a elevada precisão da picnometria a gás na determinação do volume efetivamente ocupado pela fase sólida de materiais particulados. De forma semelhante, [4] ressaltam que a utilização de gases inertes reduz interferências associadas ao aprisionamento de ar e às dificuldades de saturação frequentemente observadas em métodos convencionais por via úmida, favorecendo maior estabilidade e repetibilidade dos resultados.

Para o rejeito filtrado avaliado neste estudo, os resultados indicaram que os valores de densidade esquelética obtidos por picnometria a gás podem ser considerados equivalentes ao parâmetro Gs tradicionalmente determinado pelo método convencional utilizando balão volumétrico com bomba de vácuo. Essa equivalência mostra-se particularmente válida para materiais granulares de baixa porosidade intrapartícula, como o rejeito arenoso estudado, permitindo aplicação direta dos resultados nos cálculos de índice de vazios, grau de compactação e demais relações volumétricas utilizadas no controle geotécnico operacional.

Além da elevada concordância técnica observada entre os métodos, a principal vantagem identificada foi a significativa redução do tempo de execução do ensaio. Enquanto a metodologia convencional utilizando balão volumétrico com bomba de vácuo demandava aproximadamente 36 horas para estabilização e conclusão do procedimento, a picnometria a gás possibilitou a obtenção dos resultados em aproximadamente 30 minutos. Esse ganho operacional permitiu maior agilidade na liberação das camadas compactadas, redução do tempo de resposta laboratorial e diminuição de retrabalhos associados à espera pelos parâmetros geotécnicos necessários ao controle tecnológico.

Os resultados demonstram que a utilização do picnômetro a gás constitui uma alternativa tecnicamente confiável e operacionalmente eficiente para aplicação em rotinas de controle tecnológico de rejeitos filtrados compactados, contribuindo para otimização do processo de empilhamento drenado e aumento da rastreabilidade geotécnica das camadas executadas.

4.2. Aplicação do PDL

Através de um estudo de caso, o presente trabalho visa apresentar uma avaliação numérica para caracterização de camadas de rejeitos filtrados compactados com aspectos de “borrachudos”, com a realização do Penetrômetro Dinâmico Leve (PDL), conforme resultados obtidos em um estudo de caso desenvolvido em atividades de empilhamento de rejeito filtrado compactado em pilhas de rejeitos localizadas na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

Em resumo, [11] define como procedimento de compactação do solo qualquer atividade relacionada a redução, mais ou menos rápida, do índice de vazios, por meio de energia mecânica aplicada, com o resultado na expulsão ou compressão do ar dos

vazios dos poros, diferente do processo de adensamento, tendo nesse a expulsão de água obtida de forma lenta. Ainda conforme o autor, o solo “borrachudo” é resultante de uma tentativa de super compactação de um solo, com umidade acima da ótima, elevação da saturação, de forma que a energia aplicada passa a ser transferida para a água, que tem como resultado um material elástico, com desenvolvimento de um processo de cisalhamento ao longo de planos horizontais, classificados como solo “borrachudo”, através da avaliação visual.

O Penetrômetro Dinâmico Leve (PDL) (também conhecido como DPL) é um ensaio que tem como o objetivo a cravação de um conjunto composto por uma ponteira cônica de área projetada de 10,0 cm2 e hastes de 1,0 m de comprimento e 22,0 mm de diâmetro a partir da superfície, a fim de se obter o número de golpes necessários para o avanço a cada 10,0 cm (N10). Esse conjunto padronizado é associado a uma cabeça de bater e uma haste guia por onde um martelo de 10 kg cai de uma altura de 50 cm [12]. Salienta-se que pode ser considerado um ensaio rápido, simples e objetivo, com o uso comum em empreendimentos de menor porte, bem como, ensaio complementar para atividades de tratamento de fundações e possibilita uma análise numérica nas condições de resistência e deformabilidade dos solos [13].

A fim de se avaliar o comportamento de camadas de 30 cm de espessura de rejeito filtrado compactado, sendo o rejeito com proporções granulares e finos entre 90/10 e 80/20, foram realizados ensaios de PDL após a compactação do material, bem como a avaliação técnica quanto ao aspecto de exsudação de água e deformabilidade do rejeito para a classificação como: camada aprovada sem borrachudo, “borrachudo” intermediário e “borrachudo”, a depender da proporção e nível de deformabilidade da camada. Os registros de camadas compactadas com aspectos de “borrachudos”, com evidências de maiores deformabilidades, exsudação de água e super compactação com elevação da saturação do rejeito.

Nota-se a baixa quantidade de golpes que foram necessários para a cravação da haste com a realização do ensaio.

Os registros das camadas em que não foram evidenciados “borrachudos”, com a compactação do rejeito filtrado na faixa alvo de umidade próximo da ótima. Observou-se que o número de golpes foi superior a 50 e, para ensaios realizados cerca de 24 horas após a atividade de compactação, houve a redução da umidade da camada e aumento considerável no número de golpes para cravação dos 30 cm no ensaio de PDL. Notou-se também certa dificuldade, com a deformação da haste durante a realização do ensaio, devido a elevada densificação da camada.

Com isso, foram realizados 48 ensaios de PDL, sendo: 16 aprovados sem borrachudo, 08 “borrachudos” intermediário e 15 “borrachudo”. Os gráficos com os respectivos resultados de número de golpes para cada profundidade de execução do ensaio são apresentados na Figura 2. Nota-se que para a cravação de 30 cm da haste com a execução do PDL foram necessários mais de 50 golpes nas camadas sem borrachudo, entre 41 e 50 golpes para o “borrachudo” intermediário e menos de 40 golpes para os “borrachudos”.

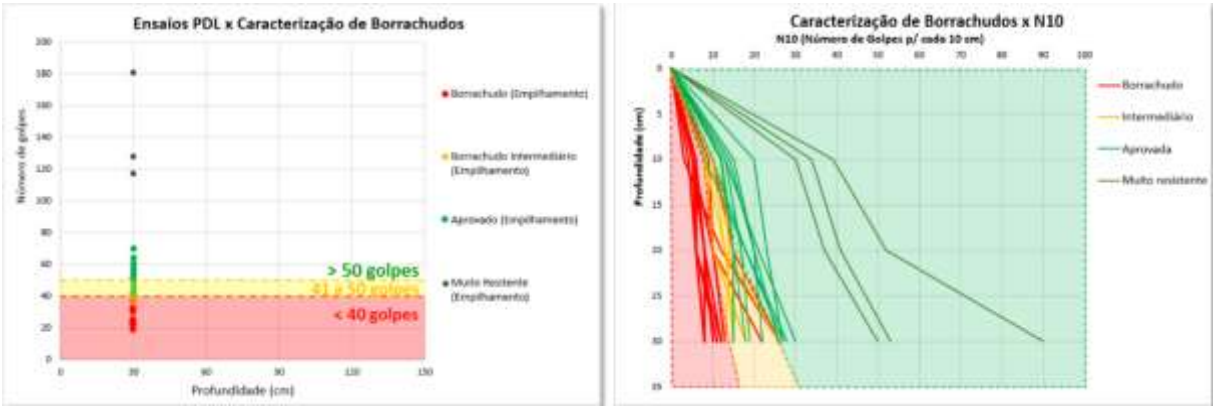


Figura 2 - Quantitativo de golpes Ensaio PDL x Caracterização de borrachudos.
Fonte: Autores (2026)

Sendo assim, a Figura 2 apresenta um comparativo entre os resultados obtidos para cada classificação da camada compactada, com uma avaliação quanto ao N10 (número de golpes necessários para o avanço de 10 cm).

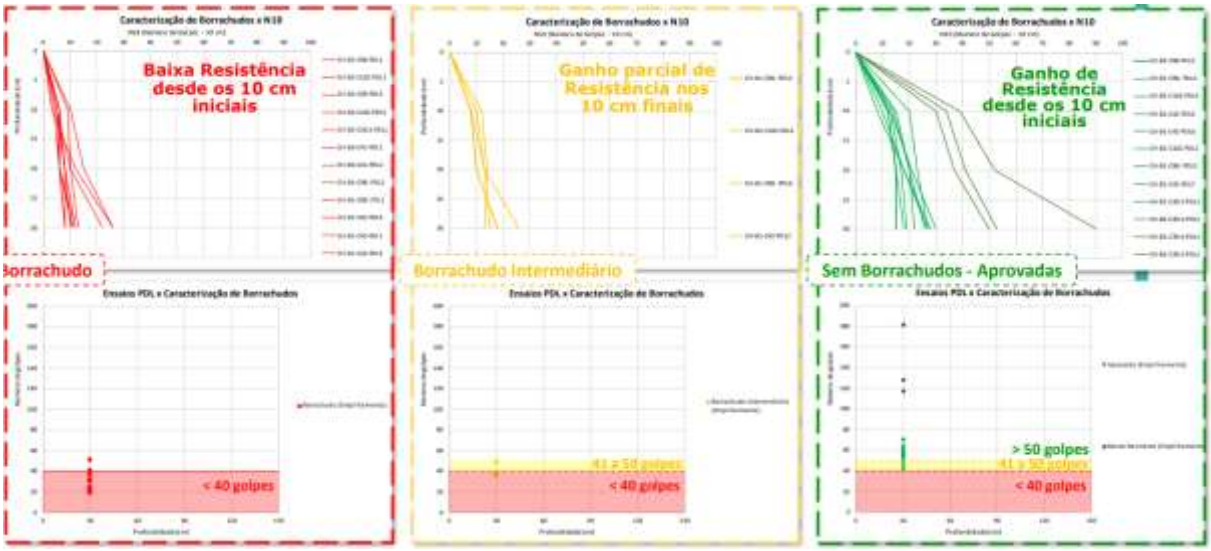


Figura 3 - Relação de classificação da camada e número de golpes.

Após a avaliação dos números de golpes necessários para o avanço de 30 cm (camada compactada), bem como os valores resultantes nos 10 cm iniciais (N10), observou-se que para as camadas definidas como “borrachudo”, com números de golpes totais inferiores a 40 golpes, não há ganho de resistência significativa ao longo da camada. Quanto à classificação de “borrachudo” intermediário, entre 41 e 50 golpes, notou-se um ganho parcial de resistência nos 10 cm finais da camada. Por fim, para a camada compactada sem a presença de borrachudos com valores superiores a 50 golpes, ou seja, aprovada para o empilhamento, houve o ganho de resistência desde os 10 cm iniciais da camada.

Frente ao avanço nas atividades de compactação de rejeitos filtrados no Brasil, tem-se a necessidade de implementar e aprimorar ensaios de campo e de laboratórios a fim de se manter de forma eficiente o controle tecnológico nas atividades de empilhamento. Sendo assim, o processo de empilhamento dos rejeitos tem como

objetivo principal assegurar o comportamento dilatante do material, com fatores de segurança adequados.

Com isso, pode-se considerar que o uso do PDL para a avaliação quantitativa das camadas com aspectos de solo “borrachudo” no empilhamento de rejeitos compactados pode ser uma forma de controle tecnológico complementar, a fim de se evitar avaliações visuais que podem ser subjetivas.

5. CONCLUSÃO

A aplicação integrada do picnômetro a gás e do Penetrômetro Dinâmico Leve (PDL) demonstrou elevada eficiência como ferramenta de otimização do controle tecnológico das camadas de rejeito filtrado compactado na Mina do estudo. Os resultados obtidos evidenciaram que ambas as metodologias contribuem diretamente para o aumento da agilidade operacional, redução de incertezas geotécnicas e maior assertividade na tomada de decisão durante o processo de empilhamento drenado.

Os ensaios realizados com o picnômetro a gás apresentaram elevada concordância em relação ao método convencional utilizando balão volumétrico com bomba de vácuo, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9697 e baixos resíduos absolutos observados para os valores de Gs e índice de vazios. Os resultados confirmaram a aplicabilidade da metodologia para rejeitos filtrados arenosos de minério de ferro, demonstrando que os valores obtidos podem ser utilizados de forma equivalente ao parâmetro Gs convencionalmente empregado nos cálculos geotécnicos de controle operacional. Além da confiabilidade técnica, a principal vantagem observada foi a significativa redução do tempo de ensaio, passando de aproximadamente 36 horas para cerca de 30 minutos, permitindo maior rapidez na liberação das frentes de empilhamento e redução de retrabalhos operacionais.

Paralelamente, a utilização do PDL permitiu transformar avaliações anteriormente subjetivas relacionadas ao comportamento “borrachudo” em critérios quantitativos de fácil aplicação em campo. Os resultados demonstraram que valores inferiores a 40 golpes para cravação de 30 cm estão associados a camadas excessivamente deformáveis, com presença de exsudação e elevada saturação. Valores entre 41 e 50 golpes indicaram comportamento intermediário, enquanto resultados superiores a 50 golpes foram compatíveis com camadas adequadamente compactadas e aptas para continuidade do empilhamento. Dessa forma, o PDL mostrou-se uma ferramenta eficiente para complementação do controle tecnológico, proporcionando maior padronização das avaliações de campo e aumento da confiabilidade operacional.

A integração entre a rapidez analítica proporcionada pela picnometria a gás e a avaliação expedita de resistência e deformabilidade obtida pelo PDL representa um avanço significativo para as rotinas de QC/QA aplicadas ao empilhamento de rejeitos filtrados compactados. A adoção dessas metodologias contribui para melhoria da rastreabilidade geotécnica das camadas executadas, otimização do ciclo de compactação, redução de paradas operacionais e aumento da segurança física das estruturas de disposição.

Por fim, os resultados obtidos neste estudo reforçam a importância da incorporação de metodologias expedidas, quantitativas e de elevada repetibilidade no contexto da

mineração moderna, consolidando o uso do picnômetro a gás e do PDL como ferramentas promissoras para o aprimoramento do controle tecnológico em operações de empilhamento drenado de rejeitos filtrados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] DAVIES, M. (2011) – “Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals”, Proceedings of Tailings and Mine Waste Conference, Tailings Management, Vancouver, Canada.

[2] BAZZANELLA, A. et al. (2020) – “Dry Stacking of Filtered Tailings: Geotechnical and Operational Aspects”, Proceedings of Tailings and Mine Waste Conference, tailings management, Chile.

[3] SCALIA, J.; BENSON, C.; EDIL, T. (2018) – “Compacted Filtered Tailings for Mine Waste Management”, Proceedings of GeoCongress 2018, Geotechnical Special Publication, Orlando, United States.

[4] OLIVEIRA, J.; LOPES, R.; SILVA, F. (2010) – “Determinação da densidade real de materiais particulados por picnometria a gás”, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, caracterização de materiais, Campos do Jordão, Brasil.

[5] WEBB, P.; ORR, C. (1997) – “Analytical Methods in Fine Particle Technology”, Micromeritics Instrument Corporation, Norcross, United States.

[6] JOYCE, A. (1961) – “Helium Pycnometry and Density Determination of Powders”, Journal of Applied Chemistry, caracterização de materiais particulados, Londres, Reino Unido.

[7] ASTM INTERNATIONAL (2015) – “ASTM D5550 – Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer”, ASTM International Standards, geotechnical testing standards, Pennsylvania, United States.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2017) – “ABNT NBR ISO 12154 – Determinação da densidade por deslocamento volumétrico – Densidade-esqueleto por picnometria a gás”, normas técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

[9] SANGLERAT, G. (1972) – “The Penetrometer and Soil Exploration”, Elsevier Publishing Company, investigação geotécnica, Amsterdam, Netherlands.

[10] FOLQUE, J. (1986) – “Reconhecimento Geotécnico com Penetrômetros Dinâmicos”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, investigação de solos, Lisboa, Portugal.

[11] MASSAD, F. (2010) – “Mecânica dos Solos Experimental”, Oficina de Textos, compactação e comportamento de solos, São Paulo, Brasil.

[12] NAVEIRA, A.; SOUZA, M.; LIMA, R. (2020) – “Aplicação do Penetrômetro Dinâmico Leve em Solos Compactados”, Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, investigação geotécnica expedita, Campinas, Brasil.

[13] ALVES FILHO, J. (2010) – “Uso do Penetrômetro Dinâmico Leve em Avaliações Geotécnicas de Campo”, Simpósio Brasileiro de Geotecnia, ensaios de campo, Recife, Brasil.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016) – “ABNT NBR 6458 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica”, normas geotécnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

[15] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO (2005) – “ISO 22476-2 – Geotechnical Investigation and Testing – Field Testing – Part 2: Dynamic Probing”, geotechnical field investigation standards, Geneva, Switzerland.

 Victor Bretas	**Victor BRETAS** Atualmente atua como RTFE (Gerente técnico de gestão de rejeitos) na Vale. Possui especialização em geotecnia pela UFPA (2022) e curso de aperfeiçoamento em sondagem e ensaios laboratoriais pela UFRJ/Coppe (2024). Formado em engenharia de minas pra UFOP (2014) e possui MBA pela FGV em projetos (2017) e gestão financeira e auditoria **Erro! Indicador não definido.**
	**Pedro CORREA** Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com pós-graduação em Engenharia Geotécnica pela PUC Minas. Atua em controle tecnológico e geotecnia aplicada a operações de empilhamento de rejeitos filtrados compactados.
	Markus DIAS Engenheiro Civil.
	Alfredo NUNES Engenheiro Civil.
	Mateus VIANA Engenheiro Civil.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.2 – TÉCNICAS E INOVAÇÕES NA CONSTRUÇÃO DE ESTRUTURAS DE BARRAGENS E TSFS
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

PROCESSO DE QA/QC ORIENTADO A DADOS PARA VERIFICAÇÃO CONTÍNUA DA ADERÊNCIA PROJETO x OBRA EM ESTRUTURAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Bianca Mendes de Lacerda
M.Sc. Engenheira Geotécnica – Simplelab Tecnologia

Isabela David Cruz

Engenheira Civil – Simplelab Tecnologia

André Borges Coutinho
Engenheiro Geotécnico – Samarco

Viviane Aparecida Rezende
M.Sc. Engenheira Geotécnica – Samarco

Wanderson Silvério Silva
Engenheiro Geotécnico – Samarco

RESUMO

A execução de obras geotécnicas associadas a estruturas de disposição de rejeitos envolve múltiplas frentes simultâneas, grande volume de registros e tomadas de decisões críticas frequentes, o que torna a confiabilidade dos dados e a rastreabilidade do processo requisitos centrais para o controle da construção. Nesse contexto, a utilização de um sistema capaz de assegurar qualidade na aquisição dos dados em campo e laboratório, consolidar evidências e suportar decisões em tempo real se torna essencial para a garantia e verificação contínua da Aderência Projeto X Obra conforme diretrizes do GISTM. Este artigo apresenta um estudo de caso em parceria com uma mineradora localizada no quadrilátero ferrífero, descrevendo a operacionalização de um fluxo de QA/QC orientado a dados durante a execução de uma pilha de rejeitos filtrados: planejamento de verificações por especificação, coleta estruturada com validações e checagens de completude, rastreabilidade de usuários/equipamentos/calibração, registro auditável de aprovações e tratamento de não conformidades. Como elemento prático de controle operacional, são apresentados dashboards utilizados para acompanhamento da conformidade com o planejado, conectando a rotina de campo à verificação da Aderência Projeto X Obra e à produção de evidências para relatórios e databooks. O trabalho consolida lições aprendidas e recomendações replicáveis para fortalecer a disciplina de QA/QC durante a execução, reduzindo incertezas e aumentando a robustez do controle da construção de estruturas de disposição de rejeitos.

ABSTRACT

The execution of geotechnical works associated with tailings disposal structures involves multiple simultaneous work fronts, a large volume of records, and frequent critical decision-making, making data reliability and process traceability key requirements for construction control. In this context, the use of a system capable of ensuring quality in field and laboratory data acquisition, consolidating evidence, and supporting real-time decision-making becomes essential for the assurance and continuous Construction vs. Design Intent Verification in accordance with GISTM guidelines. This paper presents a case study developed in partnership with a mining company located in the Quadrilátero Ferrífero, describing the operationalization of a data-driven QA/QC workflow during the construction of a filtered tailings stack: planning of inspections based on specifications, structured data collection with validation and completeness checks, traceability of users, equipment, and calibration, auditable records of approvals, and management of nonconformities. As a practical element of operational control, dashboards used to monitor compliance with the planned requirements are presented, connecting field routines to the Construction vs. Design Intent Verification and to the production of evidence for technical reports and databooks. The paper consolidates lessons learned and replicable recommendations to strengthen the QA/QC discipline during construction, reducing uncertainties and increasing the reliability of construction control for tailings disposal structures.

1. INTRODUÇÃO

A construção de estruturas de disposição de rejeitos envolve decisões técnicas contínuas, elevado volume de informações e interação constante entre projeto, materiais, método construtivo e controle de campo. Diferente de obras em que a verificação pode ocorrer de forma mais pontual, estruturas geotécnicas associadas à mineração exigem acompanhamento sistemático ao longo de sua execução, uma vez que o desempenho final depende diretamente da forma como cada etapa é construída, registrada, verificada e liberada. Essa abordagem é coerente com as diretrizes do ICOLD (2022) [1], que tratam a segurança de estruturas de rejeitos como resultado de um processo integrado ao longo do seu ciclo de vida, incluindo planejamento, projeto, construção, operação, monitoramento e gestão de riscos.

O avanço das tecnologias de disposição de rejeitos com menor teor de água tem ampliado a adoção de soluções como o empilhamento de rejeitos filtrados, em um contexto onde se busca reduzir riscos operacionais. Experiências práticas mostram que o sucesso dessas soluções depende da concepção de projeto, do controle rigoroso da execução, da caracterização dos materiais e da verificação das condições reais de lançamento e compactação em campo (Gomes et al., 2016; Cacciuttolo Vargas et al., 2022) [2, 3]. Nesse sentido, a construção das pilhas deve ser entendida como um processo técnico progressivo, no qual a liberação de cada camada precisa estar apoiada em dados confiáveis e evidências rastreáveis.

O controle tecnológico é o principal mecanismo para demonstrar, durante a execução, que as especificações técnicas de projeto estão sendo cumpridas rigorosamente. Ensaios de campo e laboratório permitem verificar parâmetros físicos, mecânicos e hidráulicos dos materiais, apoiando decisões de aceitação, reprovação, correção ou reconstrução de camadas, tornando esse processo parte integrante da construção de forma ativa ao longo da obra (McKenna, 2023; Liang et al., 2024) [4, 5]. A rotina de construção de pilhas e barragens de rejeitos envolve múltiplas frentes de trabalho,

diferentes equipes, empresas contratadas, equipamentos, amostras, áreas, subáreas, camadas, ensaios e critérios de aceitação. A operação gera um volume expressivo de dados, que precisa ser registrado, conferido, validado, analisado e disponibilizado em tempo compatível com o ritmo da obra.

A forma como os dados são geridos influencia diretamente na qualidade das decisões técnicas. Quando essas informações são conduzidas por meio de fichas físicas, planilhas eletrônicas, transcrições manuais e diretórios descentralizados, aumentam os riscos de inconsistências, atrasos nas validações, perda de rastreabilidade e dificuldade de consolidação de evidências. As construções de pilhas e barragens podem gerar milhares de arquivos de ensaios, distribuídos em grande número de pastas, exigindo tempo significativo das equipes de engenharia para organização de relatórios e databooks. Esse cenário evidencia que a confiabilidade do controle tecnológico depende tanto da execução adequada dos ensaios quanto da existência de um fluxo estruturado para aquisição, validação, rastreabilidade e uso dos dados (Lacerda e Chammas, 2023) [6].

A digitalização do controle tecnológico surge, nesse contexto, como uma alternativa para reduzir fragilidades associadas a fluxos manuais e descentralizados. Sistemas digitais aplicados à geotecnia permitem registrar os dados diretamente na origem, padronizar fichas de ensaio, aplicar checagens de completude, automatizar validações, associar resultados a áreas e camadas específicas, controlar aprovações e consolidar evidências para relatórios técnicos. Em obras de descaracterização de barragens, a aplicação de engenharia digital também tem demonstrado ganhos relevantes na criação de bancos de dados unificados, na rastreabilidade das informações, na integração com ferramentas de BI e na alimentação de databooks (Lima et al., 2025) [7].

Além do ganho operacional, a estruturação digital dos dados fortalece a governança técnica da construção. O *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM) reforça a necessidade de gestão responsável das estruturas de rejeitos, com tomada de decisão baseada em informações confiáveis, documentação adequada e integração entre projeto, construção, operação e monitoramento (Global Tailings Review, 2020) [8]. Na fase de construção, esses princípios se traduzem na necessidade de verificar continuamente se aquilo que está sendo executado em campo corresponde ao que foi definido em projeto e especificações técnicas. A verificação da Aderência Projeto x Obra (APO) depende de registros completos, consistentes, rastreáveis e tecnicamente auditáveis.

Apesar disso, a gestão do *Quality Assurance/Quality Control* (QA/QC) em obras geotécnicas de grande porte ainda enfrenta desafios relevantes, frequentemente sendo praticada como um processo de verificação final de conformidades. O QA/QC deve ser compreendido e executado como uma disciplina de gestão da qualidade, de forma contínua ao longo da construção. O Quality Control (QC) é relacionado à execução das verificações, medições e ensaios necessários para comprovar a conformidade dos materiais e camadas executadas. O Quality Assurance (QA), por sua vez, estabelece as condições para que esse controle seja planejado, executado, validado e documentado de forma padronizada e rastreável. Trabalhos da literatura reforçam essa abordagem, ao reforçarem a importância de processos sistemáticos

para verificar se os requisitos de projeto estão sendo efetivamente atendidos durante a construção de estruturas de disposição de rejeitos (Rojas et al., 2025) [9].

Nesse cenário, o Geolabor (Simplelab Tecnologia, 2024) [10] é utilizado como ferramenta digital para estruturar e centralizar o fluxo de QA/QC aplicado à construção de estruturas geotécnicas. O sistema permite organizar dados de planejamento, execução, validação, aprovação e emissão de relatórios em uma base única, conectando registros de campo e laboratório aos critérios de aceitação definidos para cada material, área ou camada. Estudos anteriores já apresentam o uso do Geolabor em obras de pilhas, barragens de rejeitos e descaracterização, destacando sua aplicação para centralização de dados, rastreabilidade, redução de fluxos manuais, emissão de relatórios e suporte à tomada de decisão técnica (Lacerda e Chammas, 2023; Lima et al., 2025) [6, 7]].

Este artigo apresenta um estudo de caso desenvolvido em parceria com uma mineradora localizada no Quadrilátero Ferrífero, com foco na utilização do Geolabor como ferramenta central para garantia da qualidade do QA/QC e verificação da Aderência Projeto x Obra durante a construção de uma pilha de rejeitos filtrados, utilizando dados reais extraídos do sistema. O trabalho descreve a operacionalização de um fluxo orientado a dados, contemplando o planejamento das verificações por especificação técnica, a coleta estruturada de informações, as validações automáticas, as checagens de completude, a rastreabilidade de usuários, equipamentos e calibrações, o registro auditável de aprovações e o tratamento de não conformidades.

Como contribuição prática, o artigo apresenta, ainda, a aplicação de dashboards para acompanhamento da conformidade entre o planejado e o executado, conectando a rotina de campo e laboratório à gestão técnica da obra. Busca-se demonstrar que a estruturação digital do QA/QC pode fortalecer a produção de evidências, reduzir incertezas, apoiar decisões em tempo real e contribuir para uma verificação mais consistente da aderência entre projeto e construção, em alinhamento com os princípios de rastreabilidade, governança e controle tecnológico aplicáveis às estruturas de disposição de rejeitos.

2. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso contempla uma pilha de disposição compartilhada de rejeito e estéril em operação, localizada no Quadrilátero Ferrífero, com volume total de projeto próximo a 30 Mm³. A estrutura recebe materiais com características geotécnicas distintas, o que exige uma rotina de controle tecnológico capaz de verificar, de forma contínua, o atendimento aos critérios de compactação, às especificações de projeto e às condições de liberação das camadas executadas. O Geolabor vem sendo utilizado na obra desde 2021 como ferramenta de gestão dos dados geotécnicos e suporte ao fluxo de QA/QC, centralizando registros de campo e laboratório, resultados de ensaios, validações e evidências associadas ao controle da construção.

Os dados avaliados neste estudo são referentes a aproximadamente 4.500 ensaios de diferentes tipos, dependendo do material e escopo. Para o estéril, o controle de

compactação é realizado por meio dos ensaios de frasco de areia e HILF. Para o rejeito, são utilizados os ensaios de cilindro biselado e HILF, incluindo também o controle do índice de vazios como parâmetro de acompanhamento. Além dos ensaios diretamente relacionados à compactação, são realizadas verificações periódicas das características físicas e hidráulicas dos materiais, como granulometria e permeabilidade, aplicáveis tanto ao rejeito quanto ao estéril. Essa combinação de controles permite acompanhar a variabilidade dos materiais e avaliar a conformidade da execução frente aos critérios técnicos estabelecidos para a pilha.

Com o uso do Geolabor, a coleta dos dados do controle tecnológico é realizada diretamente em campo, em ambiente digital, permitindo que cada registro seja criado no momento da execução e associado à sua localização real na obra. Essa forma de aquisição reduz etapas intermediárias de transcrição, diminui o risco de perda ou alteração de informações e fortalece a rastreabilidade entre o ensaio, a camada executada, o material e a frente de trabalho correspondente. Além disso, a geração de registros georreferenciados permite que os resultados sejam organizados espacialmente em um mapa interativo, como ilustrado na Figura 1, possibilitando a visualização da distribuição dos ensaios ao longo da pilha, auxiliando na identificação das áreas já avaliadas, regiões com maior concentração de ensaios e eventuais trechos que demandem complementação de verificações.

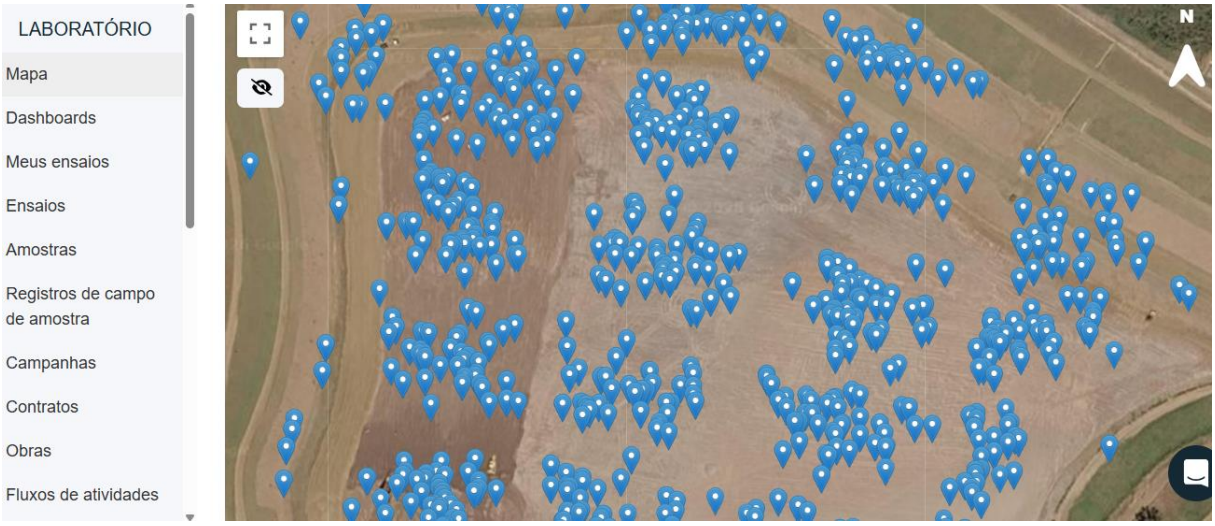


Figura 1 – Visualização em mapa das amostras coletadas diretamente em campo.

A estrutura da obra foi reproduzida no Geolabor de forma a representar a organização real das frentes de construção. Para isso, a pilha foi cadastrada no sistema com suas respectivas divisões operacionais, incluindo áreas, subáreas, etapas, praças de construção e demais unidades de controle utilizadas pela equipe de campo. Essa parametrização permite que cada ensaio, amostra, camada, registro de campo ou evidência seja vinculado diretamente ao seu local de execução, preservando a lógica construtiva adotada na obra e evitando que os dados sejam tratados de forma desconectada do contexto da estrutura. Dessa forma, o sistema passa a funcionar como uma representação digital da obra, permitindo que o controle tecnológico acompanhe a evolução da construção de maneira organizada, rastreável e compatível com os critérios definidos para cada área ou material, conforme a Figura 2.



Figura 2 – Digitalização da divisão física da estrutura no sistema.

A digitalização dessa hierarquia é uma etapa fundamental para a gestão do QA/QC, pois possibilita que os registros sejam filtrados, avaliados e consolidados conforme a própria estrutura de controle da obra. Ao associar os dados às praças e áreas correspondentes, o Geolabor permite acompanhar quais trechos já foram executados, aqueles que possuem ensaios pendentes, quais camadas estão liberadas ou bloqueadas e onde há necessidade de complementação de verificações. Essa organização também favorece a emissão de relatórios por área, camada ou período, além de sustentar evidências para a verificação da Aderência Projeto x Obra.

Além da organização hierárquica das áreas no sistema, a divisão da estrutura também pode ser representada em modelos 2D e 3D, permitindo uma leitura espacial mais direta das praças de construção, das camadas executadas e da distribuição dos registros de controle tecnológico. Essa visualização amplia a capacidade de análise do QA/QC, conectando a geometria da obra às informações registradas em campo e laboratório, permitindo que áreas, subáreas, amostras, ensaios e respectivos resultados sejam avaliados de forma integrada. O mapa 2D deste estudo é

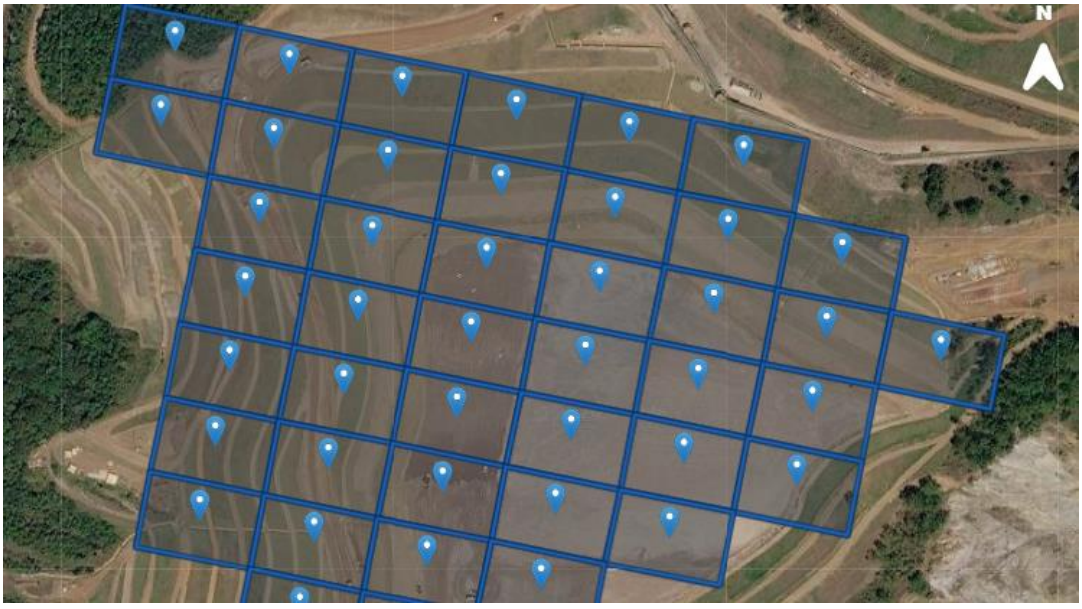


Figura 3 – Mapa 2D com a divisão física das áreas e praças de construção digitalizada.

O modelo 3D possibilita filtrar áreas, realizar cortes por camada ou elevação e consultar informações associadas a cada elemento da estrutura, além da visualização espacial dos resultados dos ensaios executados, favorecendo o acompanhamento da evolução construtiva e a identificação de inconsistências nos registros. Um estudo de caso específico da aplicação do modelo 3D implementado no Geolabor na prática, e apresentado na Figura 4, é apresentado por Lacerda et al. (2024) [11].



Figura 4 – Modelo 3D com a distribuição espacial das amostras e divisões da estrutura (Lacerda et al., 2024) [8].

A partir dessa divisão estruturada no Geolabor, são cadastradas as especificações técnicas de projeto aplicáveis a cada área no sistema (Figura 5), podendo incluir critérios de escopo, topográficos, critérios para ensaios e curvas auxiliares, permitindo que a avaliação da conformidade seja realizada de forma automatizada ao longo da execução. Dessa forma, os dados registrados em campo e laboratório deixam passam a ser validados em tempo real, facilitando a comunicação do campo com o escritório.

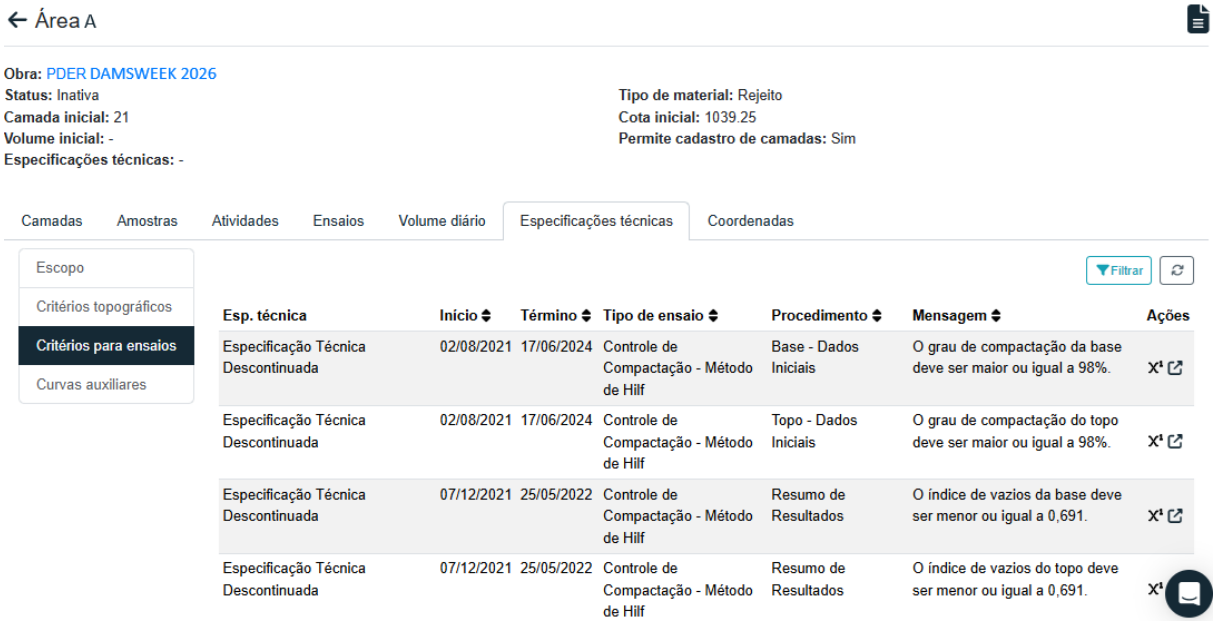
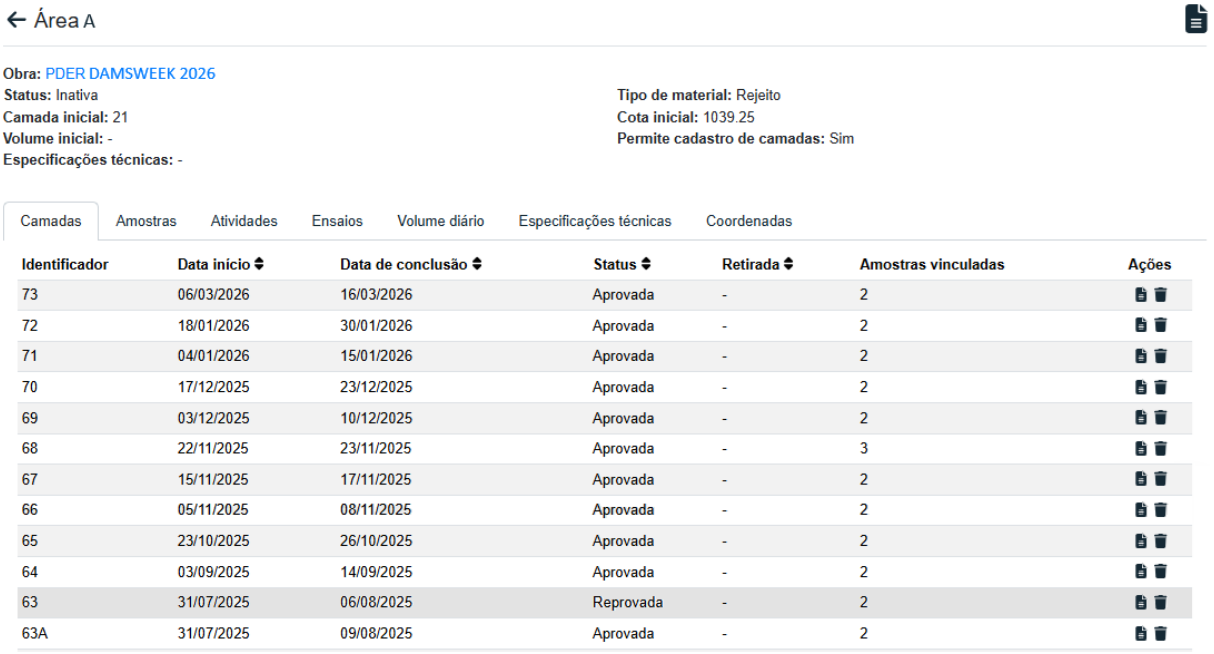


Figura 5 – Cadastro das especificações técnicas de projeto para cada área do Geolabor.

Com a definição desse fluxo, é garantida a gestão de mudanças das especificações técnicas ao longo da obra. Como estruturas geotécnicas em operação podem passar por revisões de projeto, ajustes executivos ou atualização de critérios de aceitação, o Geolabor permite cadastrar a vigência de cada registro. Com isso, camadas e ensaios são avaliados de acordo com a especificação válida no momento de sua execução, preservando o histórico técnico da obra e evitando que resultados antigos sejam reinterpretados indevidamente a partir de critérios posteriores.

Essa funcionalidade apoia tanto o QA/QC, quanto a verificação da Aderência Projeto X Obra em tempo real. Ao aplicar automaticamente os critérios cadastrados, o sistema permite que as equipes de campo, laboratório e engenharia acompanhem a situação das áreas e camadas durante a execução, identificando o que está aprovado, o que permanece pendente e o que precisa ser tratado antes da liberação. Na prática, isso facilita a visualização das áreas disponíveis para disposição e reduz o intervalo entre a geração do dado, sua validação técnica e a tomada de decisão operacional. Esse fluxo está alinhado aos princípios do GISTM, na medida em que fortalece a documentação, a rastreabilidade, o controle de mudanças e a tomada de decisão baseada em informações confiáveis durante a construção da pilha de rejeitos.

Em cada divisão da estrutura cadastrada no Geolabor, é realizado o lançamento das camadas executadas, com registro das respectivas datas, amostras vinculadas e status de aprovação. Esse controle permite acompanhar a evolução da construção, mantendo o histórico técnico de cada camada desde sua execução até sua liberação. Quando uma camada é reprovada, ela permanece identificada no sistema, e o tratamento adotado ou retirada passa a ser vinculado ao registro original, como pode ser observado nas camadas 63 e 63A da Figura 6.



Identificador	Data inicio	Data de conclusão	Status	Retirada	Amostras vinculadas	Ações
73	06/03/2026	16/03/2026	Aprovada	-	2	
72	18/01/2026	30/01/2026	Aprovada	-	2	
71	04/01/2026	15/01/2026	Aprovada	-	2	
70	17/12/2025	23/12/2025	Aprovada	-	2	
69	03/12/2025	10/12/2025	Aprovada	-	2	
68	22/11/2025	23/11/2025	Aprovada	-	3	
67	15/11/2025	17/11/2025	Aprovada	-	2	
66	05/11/2025	08/11/2025	Aprovada	-	2	
65	23/10/2025	26/10/2025	Aprovada	-	2	
64	03/09/2025	14/09/2025	Aprovada	-	2	
63	31/07/2025	06/08/2025	Reprovada	-	2	
63A	31/07/2025	09/08/2025	Aprovada	-	2	

Figura 6 – Cadastro das camadas dentro de uma área do Geolabor, com destaque para a camada reprovada, que recebeu tratamento para posterior aprovação.

Dentro de cada camada, são cadastradas as amostras coletadas e, a partir delas, os ensaios executados para o controle tecnológico correspondente. Ao acessar um ensaio específico no Geolabor, o sistema apresenta inicialmente sua trilha de execução, reunindo informações sobre campanha, amostra, tipo de amostra, revisão, sequencial, datas e usuários responsáveis por cada etapa do fluxo. Esse registro permite rastrear quando o ensaio foi iniciado, executado, calculado, verificado e aprovado, bem como identificar o usuário associado a cada ação. Esse fluxo é estruturado por meio de permissões de usuário previamente definidas no sistema, indicando quais informações e ações cada perfil pode acessar e executar. Todo ensaio é versionado no sistema, garantindo que nenhuma nada se perca ao longo do tempo (Figura 7).

Todas as informações inseridas permanecem registradas, preservando a integridade do histórico e reduzindo a possibilidade de alterações indevidas ou manipulação dos resultados. Além da rastreabilidade de usuários e horários, os critérios de aceitação cadastrados nas especificações técnicas são validados automaticamente durante a execução do ensaio. O atendimento ou não atendimento aos requisitos é apresentado diretamente na tela, em escala de cores, permitindo identificar de forma imediata quais critérios foram cumpridos e quais exigem análise ou tratamento. Essa combinação entre controle de permissões, trilha auditável e validação automática fortalece o QA/QC, transformando cada ensaio em uma evidência técnica rastreável para a verificação da conformidade e da Aderência Projeto X Obra.



Figura 7 – Trilha de execução de um ensaio com rastreio de usuários, versionamento e validações automatizadas no sistema.

A execução dos ensaios é realizada diretamente no Geolabor, por meio de fichas digitais configuráveis e de uma máquina de cálculo parametrizada, que assegura que os resultados sejam processados conforme definidas para cada método de ensaio. Essa lógica minimiza a dependência de cálculos manuais e transcrições sucessivas, permitindo que o ensaio seja executado, calculado, validado e aprovado dentro de um

mesmo ambiente digital. Embora a substituição do papel não seja uma exigência obrigatória para uso do sistema, a estrutura das fichas digitais permite que o fluxo físico seja eliminado quando essa for a diretriz da obra, mantendo o registro técnico em formato estruturado, rastreável e padronizado.

As fichas de execução, como a exemplificada na Figura 8, são configuradas para se adaptar à realidade operacional do cliente, preservando a lógica dos formulários e procedimentos já utilizados pelas equipes de campo e laboratório. Essa adaptação facilita a incorporação do sistema à rotina dos usuários, com uma interface orientada ao preenchimento dos dados necessários ao ensaio e à visualização imediata dos resultados calculados. Além dos campos de entrada e saída, podem ser configuradas validações internas para apoiar a execução conforme normas aplicáveis, procedimentos do projeto e boas práticas definidas para a obra. Durante o preenchimento, o sistema também permite selecionar os equipamentos utilizados, como balanças, estufas ou demais instrumentos vinculados ao ensaio, buscando automaticamente suas informações cadastrais.



Figura 8 – Ficha de execução de ensaio no Geolabor.

O Geolabor permite, ainda, anexar evidências fotográficas diretamente ao registro do ensaio, vinculando cada imagem à amostra, à camada, à área de execução e ao respectivo procedimento de controle tecnológico. Essa funcionalidade amplia a rastreabilidade do QA/QC, pois associa o resultado numérico do ensaio às condições observadas no momento da sua execução, como posicionamento do ponto, método aplicado, etapa do procedimento e equipamento utilizado. Assim, a evidência fotográfica passa a compor o conjunto de informações técnicas do ensaio, reduzindo a dependência de registros externos e permitindo que a verificação posterior seja realizada com base em dados e evidências consolidados no mesmo ambiente.

Além do armazenamento da imagem, o sistema preserva metadados relevantes para a auditoria do registro, incluindo a localização, data original da captura, data de upload

e o usuário responsável pelo envio, como apresentado na Figura 9. Essa associação entre imagem, metadados e trilha de execução dificulta a desvinculação da evidência em relação ao ensaio correspondente e fortalece a integridade documental do controle tecnológico. No contexto da verificação da Aderência Projeto x Obra, as evidências fotográficas permitem demonstrar além do resultado obtido, as condições em que o ensaio foi executado, contribuindo para a validação técnica, para a análise de eventuais não conformidades e para a composição de relatórios e *databooks* auditáveis.



Figura 9 – Cadastro das evidências fotográficas com metadados para execução de ensaio no Geolabor.

A gestão dos equipamentos utilizados nos ensaios é um componente crítico para a confiabilidade do controle tecnológico, especialmente em fluxos laboratoriais alinhados aos princípios da ABNT NBR ISO/IEC 17025. No Geolabor, os equipamentos são cadastrados e gerenciados no sistema por tipo, código, especificação, status de uso e informações de calibração, incluindo datas de vencimento e condição atual, conforme a Figura 10. Durante a execução do ensaio, o usuário seleciona o equipamento utilizado, e suas informações são automaticamente vinculadas ao registro, garantindo que o resultado obtido esteja associado ao instrumento efetivamente empregado na medição.

Esse vínculo permite que o sistema realize validações automáticas relacionadas à condição metrológica do equipamento. Caso o equipamento selecionado esteja com calibração vencida ou próxima do vencimento, a informação é sinalizada no próprio ensaio, permitindo que a equipe técnica avalie o impacto dessa condição sobre a validade do resultado. A parametrização do sistema permite definir se ensaios executados com equipamentos fora da condição esperada poderão ou não ser aprovados, conforme a regra de governança adotada pela obra ou pelo laboratório. Mesmo nos casos em que a aprovação seja permitida por usuários com perfil

autorizado, a validação permanece registrada no ensaio, preservando a evidência de que o resultado foi obtido com equipamento em condição de atenção ou não conformidade metrológica.

A gestão dos equipamentos, representada na Figura 10, fortalece o QA/QC ao integrar a rastreabilidade do ensaio à rastreabilidade dos equipamentos utilizados, reduzindo o risco de aprovação de resultados sem avaliação crítica das condições de medição. Além de apoiar a gestão da qualidade do laboratório, o controle de calibração dentro do fluxo de execução contribui para a confiabilidade dos dados, para a análise de conformidade dos resultados e para a produção de evidências auditáveis. No contexto da Aderência Projeto x Obra, esse controle garante que as decisões de liberação, reprovação ou tratamento de camadas sejam baseadas em resultados tecnicamente rastreáveis e obtidos com equipamentos cuja condição foi explicitamente verificada.

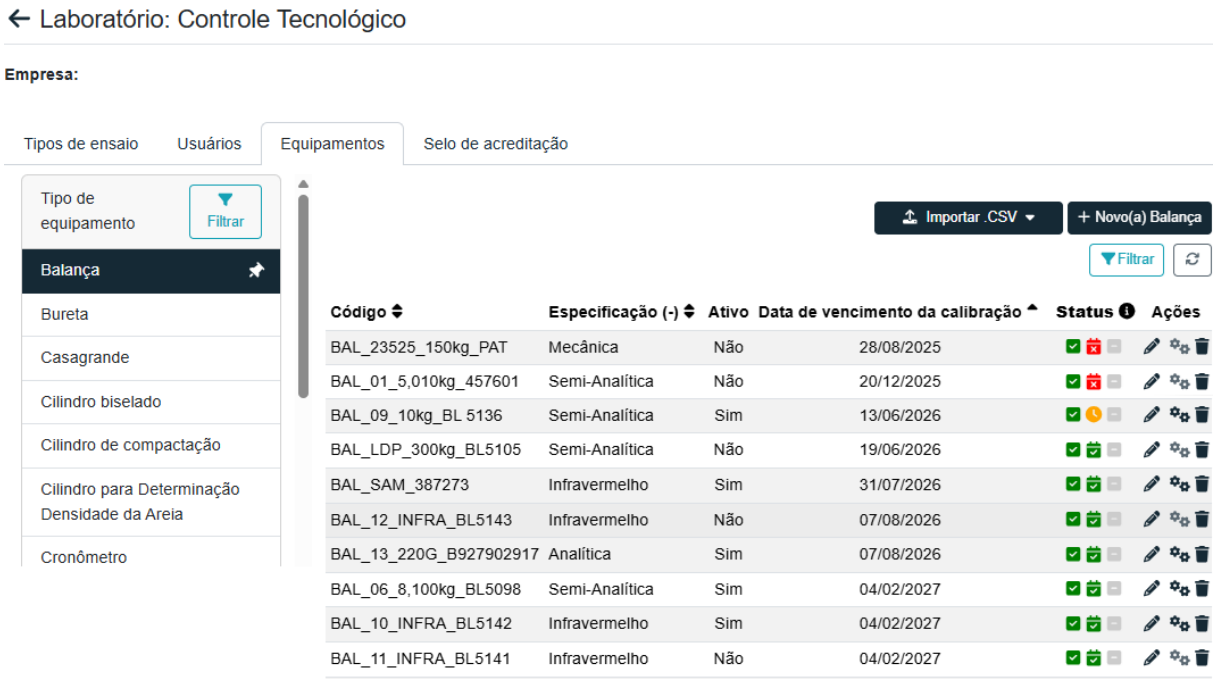


Figura 10 – Gestão de equipamentos com controle de calibração no Geolabor.

O acompanhamento da construção é realizado por meio de dashboards conectados à base de dados do Geolabor, permitindo que as informações registradas no fluxo de QA/QC sejam convertidas em indicadores técnicos de controle em tempo real. Como os painéis são alimentados diretamente pelos dados gerados no sistema, as análises são construídas a partir de registros que já percorreram o fluxo de aquisição, validação, rastreabilidade e controle de conformidade. Dessa forma, os dashboards permitem análises e tomadas de decisões com base em um banco de dados técnico estruturado, reduzindo risco de divergência entre campo, laboratório e gestão.

No estudo de caso, os dashboards são utilizados para acompanhar diferentes dimensões da qualidade da construção, incluindo o status dos ensaios, o atendimento aos critérios de aceitação, a situação de calibração dos equipamentos, o acompanhamento de camadas e a análise estatística dos parâmetros de compactação. Os painéis apresentados na Figura 11 permitem visualizar, por exemplo, a quantidade de ensaios finalizados, em verificação ou em aprovação, a

distribuição dos resultados entre atendidos e não atendidos, a condição dos equipamentos quanto à calibração e os resultados de grau de compactação por base e topo. Esse tipo de visualização facilita a identificação de tendências, pendências e pontos críticos que exigem análise técnica, sem que o gestor precise buscar manualmente informações em fichas, planilhas ou relatórios dispersos.

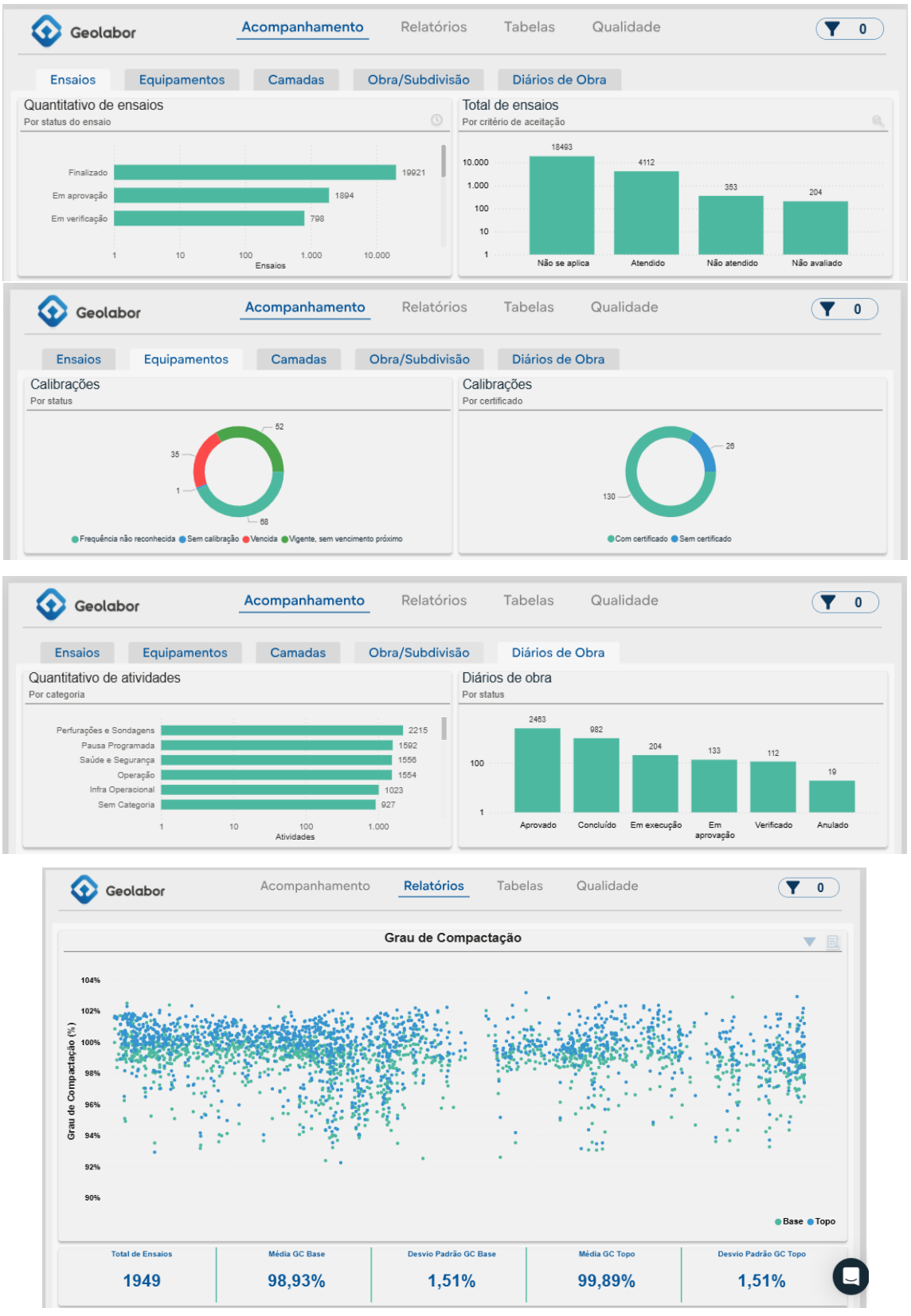


Figura 11 – Exemplos de dashboards utilizados para acompanhamento da obra.

A atualização contínua dos dashboards também fortalece a comunicação entre as equipes envolvidas na obra. A partir do uso cotidiano do sistema, o banco de dados da construção é formado de maneira progressiva e confiável, permitindo que gestores, engenheiros, laboratório e campo tenham acesso às mesmas informações, a qualquer momento e de qualquer local. Com isso, o acompanhamento do QA/QC ocorre de forma integrada à rotina da obra, apoiando decisões sobre liberação de camadas, tratamento de não conformidades, priorização de verificações e avaliação da Aderência Projeto x Obra. Assim, a qualidade do resultado final das análises é consequência direta da qualidade do dado desde sua origem, reforçando a importância de um fluxo digital controlado desde a aquisição em campo até a interpretação gerencial.

Por fim, o Geolabor permite a construção e emissão automatizada dos relatórios que compõem a documentação técnica e o *databook* da obra. A partir dos dados registrados e validados no sistema, podem ser gerados relatórios por camada, área ou campanha. No caso dos relatórios de campanha, o sistema permite a criação de modelos customizáveis, com definição prévia das informações que serão apresentadas, como contexto, período analisado, amostras vinculadas, ensaios executados, quadros-resumo e demais registros necessários à consolidação técnica do controle tecnológico.

Além dos relatórios, o Geolabor também centraliza a gestão dos documentos associados à campanha, permitindo que arquivos técnicos, evidências complementares, registros formais e demais anexos relevantes sejam vinculados diretamente ao fluxo de controle da obra (Figura 11). Essa organização evita que a documentação fique dispersa em diretórios externos, e preserva a associação entre documentos, dados de campo, ensaios, amostras, áreas e períodos de execução. Com isso, a campanha passa a reunir, em um único ambiente, tanto os dados estruturados do processo quanto os documentos que dão suporte à interpretação, validação e comprovação técnica dos registros.

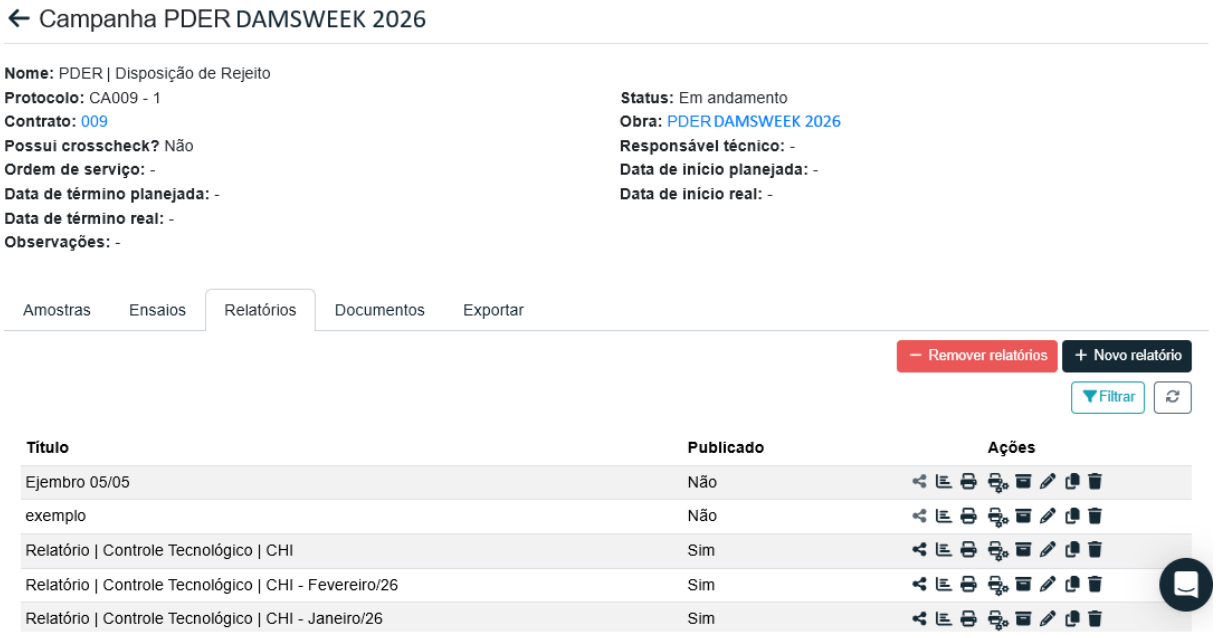


Figura 11 – Gestão da campanha e customização de relatórios automatizados.

A emissão automatizada de relatórios e a gestão centralizada dos documentos da campanha contribuem para consolidar a memória técnica da obra de forma organizada e rastreável. Ao permitir que relatórios sejam gerados a partir de modelos padronizados e que documentos de apoio permaneçam vinculados à respectiva campanha, o Geolabor reduz a fragmentação documental e facilita a recuperação das evidências utilizadas na análise técnica. Essa estrutura favorece a composição progressiva do databook, com registros organizados por campanha, período, área ou camada, preservando a relação entre os resultados dos ensaios, os documentos associados e as decisões tomadas ao longo da construção, fechando o ciclo completo de QA/QC desde a aquisição dos dados até a emissão de análises e relatórios.

Em síntese, o estudo de caso demonstra que a aplicação do Geolabor permitiu estruturar um fluxo contínuo de QA/QC, conectando a rotina de campo, o controle laboratorial, a gestão das especificações técnicas e o acompanhamento gerencial da obra. A centralização dos registros, a rastreabilidade das ações, a validação automática dos critérios de aceitação e a integração com dashboards e relatórios reduziram a fragmentação das informações e ampliaram a confiabilidade das evidências utilizadas para tomada de decisão. Dessa forma, o sistema atua, para além de uma ferramenta de registro, como uma plataforma de suporte à governança técnica da construção, contribuindo para a verificação contínua da Aderência Projeto x Obra e para a formação progressiva do histórico técnico da construção.

3. CONCLUSÕES

O estudo de caso evidencia a importância da estruturação digital do QA/QC para a construção de estruturas de disposição compartilhada de rejeito e estéril. Em uma obra de grande porte, com volume total de projeto próximo a 30 Mm³ e aproximadamente 4.500 ensaios de controle de compactação no período analisado, a confiabilidade dos registros, a rastreabilidade das decisões e a organização das evidências são elementos centrais para demonstrar a conformidade da execução frente aos critérios de projeto.

A utilização do Geolabor desde 2021 permitiu consolidar o fluxo de controle tecnológico em um ambiente único, integrando áreas, praças de construção, camadas, amostras, ensaios, especificações técnicas, equipamentos, calibrações, evidências fotográficas, aprovações e relatórios. Essa centralização reduz a fragmentação das informações e fortalece a relação entre o dado coletado, seu contexto construtivo e a decisão técnica associada.

A parametrização das especificações técnicas, com controle de vigência e gestão de mudanças, mostrou-se essencial para a verificação da Aderência Projeto x Obra. Com esse recurso, camadas e ensaios são avaliados conforme os critérios aplicáveis ao seu respectivo período de execução, preservando o histórico técnico da obra e apoiando a avaliação contínua da conformidade, em alinhamento com os princípios de rastreabilidade e governança do GISTM.

Além disso, a associação dos ensaios aos usuários responsáveis, horários de execução, equipamentos, calibrações e evidências fotográficas amplia a

confiabilidade dos resultados e a capacidade de auditoria do processo. Os dashboards conectados diretamente à base do sistema complementam esse fluxo ao permitir o acompanhamento em tempo real de ensaios, camadas, equipamentos e parâmetros geotécnicos, facilitando a identificação de pendências, não conformidades e tendências relevantes para a gestão da construção.

Por fim, a emissão automatizada de relatórios e a gestão dos documentos da campanha contribuem para a formação progressiva do *databook* da obra, reduzindo a dependência de consolidações manuais posteriores. De forma geral, o caso demonstra que a digitalização do QA/QC não representa apenas uma melhoria operacional, mas uma ferramenta de governança técnica, capaz de apoiar a confiabilidade dos registros, a tomada de decisão e a verificação contínua da Aderência Projeto x Obra.

4. PALAVRAS-CHAVE

QA/QC, GISTM, Controle Tecnológico, Aderência Projeto X Obra, Gestão da Qualidade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ICOLD. (2022) – “Tailings Dam Safety”, Bulletin 194, Committee L, International Commission on Large Dams, Paris.

[2] GOMES, R. B.; TOMI, G.; ASSIS, P. S. (2016) – “Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil”, Journal of Materials Research and Technology, v. 5, n. 4, p. 339-344.

[3] CACCIUTTOLO VARGAS, C.; PÉREZ CAMPOMANES, G. (2022) – “Practical Experience of Filtered Tailings Technology in Chile and Peru: An Environmentally Friendly Solution”, Minerals, v. 12, n. 7, artigo 889.

[4] MCKENNA, G. (2023) – “How to compact filtered tailings”, Paste 2023: Proceedings of the 25th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, p. 440-454.

[5] LIANG, Y.; BEIER, N.; BIEBER, J.; OWUSU, P. (2024) – “Measuring the In Situ Density and Moisture Content of Filtered Tailings Using an Electrical Density Gauge”, Minerals, v. 14, n. 3, artigo 231.

[6] LACERDA, B. M.; CHAMMAS, S. C. (2023) – “A Importância da Gestão de Dados Geotécnicos em Obras de Pilhas e Barragens de Rejeitos”, XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Tema 130 - Barragens de Rejeito, Foz do Iguaçu.

[7] LIMA, N.; DUARTE, M.; RIBEIRO, T.; TORRES, R.; VIEIRA, E.; ROCHA, T.; MESQUITA, G.; GUIMARÃES, V. (2025) – “Digital Engineering Applied to Technological Control in Dam Decharacterization Works”, Tailings 2025, 11th International Conference on Tailings Management.

[8] GLOBAL TAILINGS REVIEW. (2020) – “Global Industry Standard on Tailings Management”, International Council on Mining and Metals, United Nations Environment Programme and Principles for Responsible Investment.

[9] ROJAS, M.; TEH, M.; PEREIRA MAGNERE, N.; LLANO, M. (2025) – “Enhancing Quality Assurance in the Construction of Tailings Storage Facilities through Automated Workflows”, Life of Mine, Mine Waste and Tailings Conference, AusIMM, Brisbane.

[10] SIMPLELAB TECNOLOGIA. (2024) – “Geolabor”, documentação técnica do sistema, Belo Horizonte.

[11] LACERDA, B. M.; CHAMMAS, S. C.; SILVA, W.; REZENDE, V. (2024) – “Interactive three-dimensional management of data from technological control of stacks and dams – case study”, Proceedings of the XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Lisboa.

	**Bianca Mendes de Lacerda** Eng. Civil (2018) e M.Sc. em Geotecnia (2020), formada pela PUC/RJ, e M.Sc. em Estatística (2025) pela UFRJ. Desde 2021, é Eng. geotécnica, responsável pelo setor de P&D da Simplelab Tecnologia, atuando no desenvolvimento e inovação do Geolabor. Possui cursos, além de publicações e apresentações de artigos técnicos em congressos nacionais e internacionais da geotecnia. Foco de atuação na mineração, possuindo experiência com programação, modelagem e inovação.
	**Isabela David Cruz** Eng. Civil (2025) pela UFMG e pós-graduanda no IBMEC, cursando MBA em Inteligência Artificial, Data Science e Big Data para Negócio. Desde 2020, é responsável pela área de Produto da SimpleLab, atuando no desenvolvimento, evolução e estratégia do Geolabor. Possui experiência em software para mineração e geotecnia, com foco em inovação e na integração entre engenharia e tecnologia.
	**André Borges Coutinho** Engenheiro Civil (2021) e pós graduado em Geotecnia aplicada à mineração (2024). Atualmente, cursando na UFV mestrado em Engenharia Civil na área de concentração de Geotecnia, com estudos relacionados à estabilização de rejeitos de minério de ferro. Atua como Engenheiro Geotécnico na empresa Samarco, responsável pelo controle tecnológico e acompanhamento da disposição de rejeitos das pilhas e obras de descaracterização.

	**Viviane Aparecida Rezende** Eng Civil (UFOP, 2008), M.Sc Geotecnia (Nugeo, 2013). Experiencia acima de 17 anos em Geotecnia, com atuação em monitoramento de instrumentação, análise geotécnica, implantação de projetos, planejamento de disposição em barragens e pilhas. Além de supervisão operacional e coordenação das atividades com rejeito, estéril e lama. Possuo artigos publicados em congressos nacionais e internacionais e formação complementar em liderança de processos e pessoas.
	**Wanderson Silvério Silva** Eng. especialista em Geotecnia com foco em processos de planejamento e controle, projetos e operação de sistemas de disposição de rejeitos. Formado pela UFOP, mestre em Geotecnia pela UFV e 28 anos de experiência. Desde 2007 na mineração tendo atuado na Vale, MRN e Samarco. Contribuiu com soluções técnicas e de gestão para projetos e operações de disposição de rejeito. Atua como head de processo na disposição de rejeitos em Cava e rejeitos filtrados dispostos em pilha.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.2
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

Zoneamento do rejeito filtrado para melhorar índice de compactação em uma pilha de rejeito

André AZEVEDO
Engenheiro Geotécnico - VALE

Victor BRETAS
Gerente Técnico - VALE

Edilaine RIBEIRO
Técnica Geotecnia - VALE

Tiago PEREIRA
Analista de Engenharia - BVP

Cayke DOS SANTOS

Engenheiro Geotécnico - BVP

RESUMO

O zoneamento operacional da pilha de rejeito filtrado em regiões externa e interna foi avaliada como estratégia para elevar o ritmo de compactação durante o período chuvoso, assegurando simultaneamente a conformidade com os critérios de segurança geotécnica. Para isso, foi implantado um aterro experimental no ramo úmido, utilizando rejeito total/parcial (90/10), com o objetivo de analisar o comportamento mecânico do material em camadas de 30 e 60 cm sob condições de umidade elevada. O programa experimental envolveu o acompanhamento do índice de vazios de amostras indeformadas, a avaliação do comportamento contrátil e dilatante, medições de poropressões por instrumentação dedicada e ensaios de campo como CPTu, permitindo a calibração dos parâmetros de resistência e a validação dos valores de Ru empregados nas análises de estabilidade. Os resultados confirmaram a viabilidade do zoneamento operacional da pilha, com definição de critérios específicos para as regiões frontal (externa) e interna. A região frontal foi delimitada com extensão mínima de 20 m, destinada ao empilhamento de rejeito parcial com umidade de até 13,5%. Na região interna, a faixa operacional para o rejeito 90/10 foi ampliada para valores entre 13,5% e 15,5%, sem que a ocorrência de camadas classificadas como “borrachudo” constituísse critério de rejeição, desde que mantido o monitoramento geotécnico contínuo da estrutura. Essa abordagem permitiu aumento de aproximadamente 85% na taxa de empilhamento durante o período chuvoso, reforçando a flexibilidade do processo construtivo e a eficiência operacional no manejo do rejeito filtrado.

Palavras-chave: empilhamento de rejeitos filtrados, compactação, Ru, zoneamento

ABSTRACT

Operational zoning of filtered tailings stacks into external and internal regions was evaluated as a strategy to increase compaction rates during the rainy season while ensuring compliance with geotechnical safety criteria. An experimental embankment was constructed in the wet sector using partially filtered tailings (90/10) and sandy tailings to assess the mechanical behavior of the material placed in 30 cm and 60 cm layers under high moisture conditions.

The experimental program included monitoring the void ratio of undisturbed samples, evaluating contractive and dilative behavior, measuring pore pressures using dedicated instrumentation, and conducting field tests such as CPTu. These analyses allowed calibration of strength parameters and validation of Ru values used in stability analyses.

The results indicated feasibility for stacking sandy tailings with moisture contents of up to 17.5% when combined with an internal drainage system. Clear operational criteria were also established between the outer and inner zones, with a minimum offset distance of 20 meters. In the internal zone, the acceptable moisture range for the 90/10 tailings was expanded to 13.5%–15.5%. The presence of layers classified as "rubbery" (soft/unstable) did not result in rejection, provided that continuous structural monitoring was maintained.

This approach enabled an approximate 85% increase in stacking rates during the rainy period, enhancing both construction flexibility and operational efficiency in filtered tailings management.

Keywords: filtered tailings stack, compaction, Ru, zoning

1. INTRODUÇÃO

A gestão moderna de Pilhas de Rejeito Filtrado e Compactado (PDR's) tem demandado maior flexibilidade operacional frente às variações do processo, especialmente aquelas associadas ao teor de umidade e às diferentes origens litológicas do minério que dá origem ao rejeito estudado. Nesse contexto, os parâmetros de compactação, como energia aplicada e espessura das camadas, precisam ser ajustados continuamente em campo para garantir a segurança geotécnica da estrutura sem comprometer a produtividade da disposição.

Em países com elevados índices pluviométricos, como o Brasil, premissas operacionais excessivamente restritivas para a disposição de rejeitos podem comprometer a continuidade operacional, resultando em redução da capacidade de disposição ou até mesmo na paralisação temporária das atividades minerárias.

Para que essa flexibilidade operacional seja alcançada sem prejuízo ao desempenho geotécnico, é necessário assegurar que o rejeito compactado apresente comportamento predominantemente dilatante. Conforme estabelecido pela Mecânica dos Solos dos Estados Críticos (CSSM), a resposta mecânica do material é governada pelo parâmetro de estado (Ψ), que relaciona o índice de vazios atual ao índice de vazios no estado crítico sob a mesma tensão efetiva. Com base nesse conceito, [1] demonstram que a avaliação do estado de compactação do material, a partir das condições de densidade e índice de vazios, permite definir uma janela operacional de compactação capaz de acomodar variações do material sem perda de desempenho geotécnico. Quando o rejeito é compactado abaixo da Linha de Estado Crítico ($\Psi < 0$), o comportamento dilatante sob cisalhamento reduz o potencial de geração de poropressões excessivas.

Essa abordagem difere dos métodos tradicionais de controle tecnológico baseados em limites rígidos de umidade ótima definidos pelo ensaio Proctor. [2] observaram que variações no teor de finos alteram a curva de compactação, mas não impedem necessariamente a obtenção de estados dilatantes. Dessa forma, a ampliação da janela operacional de umidade pode ser tecnicamente viável, desde que a energia de compactação aplicada seja suficiente para induzir a densificação necessária ao alcance das condições de desempenho geotécnico requeridas para os diferentes tipos de rejeito.

Estudos do Australian Centre for Geomechanics [3] indicam que processos de homogeneização, secagem e escarificação controladas aumentam a capacidade de adaptação operacional frente à variabilidade do teor de umidade dos rejeitos. Nesse contexto, parâmetros executivos, como espessura das camadas e número de passadas do rolo, podem ser ajustados com base nos resultados do controle tecnológico de campo, enquanto os critérios de aceitação relacionados à granulometria e à umidade permanecem vinculados ao atendimento das premissas e requisitos estabelecidos em projeto.

A validação dessa estratégia de flexibilização operacional está, normalmente, associada à utilização de testes mais ágeis que os ensaios destrutivos convencionais, permitindo decisões operacionais em menor intervalo de tempo. Entre as abordagens alternativas, destacam-se os trabalhos conduzidos pela Colorado State University [4], que demonstram o potencial do uso de medições de velocidade de onda de

cisalhamento (Vs) para correlacionar rigidez e resistência ao parâmetro de estado (Ψ), permitindo avaliar rapidamente se a camada compactada atingiu uma condição dilatante segura.

Diante desse cenário, este trabalho discute a viabilidade técnica da flexibilização operacional na compactação de rejeitos filtrados, com foco na aplicação dos conceitos de estado crítico como critério de desempenho geotécnico, no estabelecimento de janelas operacionais de compactação capazes de acomodar a variabilidade do material e no suporte à tomada de decisão operacional.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade da disposição de rejeito filtrado compactado no ramo úmido, com base em resultados de um aterro experimental conduzido em uma mina do quadrilátero ferrífero. Nesse contexto, os objetivos específicos incluem a avaliação da eficiência de compactação do rejeito em camadas de 30 centímetros e 60 centímetros compactadas acima da umidade ótima de compactação, bem como a análise do comportamento mecânico das camadas por meio de ensaios triaxiais especiais, investigações de campo com piezocone (CPTu) e instrumentação com piezômetros elétricos. Busca-se ainda avaliar a estabilidade geotécnica da estrutura e verificar se as condições de compactação estudadas podem reduzir as restrições operacionais associadas aos períodos chuvosos, nos quais a elevação da umidade dos rejeitos frequentemente impacta a produtividade da disposição.

3. METODOLOGIA

A pesquisa foi estruturada de forma sequencial, visando validar premissas geotécnicas para empilhamento de rejeitos filtrados.

Inicialmente, realizou-se a caracterização física dos materiais, com base na análise granulométrica adotando-se o diâmetro de passante na peneira de 10 mícrons (μm) como parâmetro discriminante dessa partição. Determinando o Indice de vazios máximo de 0,64.

Na sequência, os rejeitos foram classificados conforme a partição total/parcial (90/10), definindo-se as especificações do aterro experimental. Essas especificações contemplaram uma faixa de umidade entre 9,0% e 18% e grau de saturação inferior a 80%, sendo considerado como ramo úmido o material com teor de umidade superior a 12,5%. A classificação 90/10 indica que aproximadamente 10% do material é passante na peneira de 10 μm. Esse material foi denominado rejeito parcial por apresentar comportamento geotécnico intermediário entre o rejeito arenoso e o rejeito total da mina. Para efeito de comparação, o rejeito total apresenta partição 80/20, com cerca de 20% do material passante na peneira de 10 μm, resultando em maior teor de finos e características de comportamento distintas.

A área experimental foi implantada dentro de um empilhamento já existente, respeitando afastamento mínimo de 70 metros dos taludes, de modo a garantir condições seguras e representativas. O aterro teste foi dimensionado com 20 m × 50 m × 6 m e subdividido em duas faixas operacionais, com execução de camadas compactadas de 30 centímetros e 60 centímetros, permitindo avaliar a influência da espessura no desempenho geotécnico. A Figura 1 mostra o local escolhido para o teste.



Figura 1 - Vista superior da área de implantação do Aterro Teste (Fonte: Google Earth).

A Figura 2 traz o processo de umectação das camadas testes para garantir variabilidade da umidade.



Figura 2 - Umectação do material com apoio de caminhão Pipa.

Para avaliação do desempenho de compactação, foi estabelecido que ambas as pistas (30 cm e 60 cm) fossem compactadas com rolo liso vibratório e 20 toneladas sem vibração, com número de passadas variando de 4 a 6. A Figura 3 mostra a compactação sendo realizada nas pilhas experimentais.



Figura 03 - Compactação das pistas com uso do rolo compactador de 20 tf.

A densidade *In Situ* do material foi obtida pela cravação do cilindro biselado. Os controles foram realizados no meio das camadas com 30 cm e no topo/base das camadas compactadas com 60 cm, sendo os ensaios realizados em dois pontos representativos da camada compactada. As coletas das amostras deformadas e indeformadas foram realizadas após o controle tecnológico das camadas. A Figura 4 mostra o processo da coleta das amostras indeformadas.



Figura 4 - Coleta das amostras indeformadas para ensaios em laboratório – Aterro Experimental no Ramo Úmido.

Foi realizada a instalação de piezômetro elétrico afim de monitorar a poropressão gerada com os carregamentos durante a construção do aterro experimental. A Figura 5 a instalação do instrumento na segunda camada.



Figura 5 - Instrumentação Geotécnica instalada no Aterro Teste.

A execução do aterro ocorreu sob controle dos parâmetros definidos, seguida pela investigação geotécnica por meio de ensaios de piezocone (CPTu) e ensaios especiais de laboratório, possibilitando a avaliação do comportamento dos materiais quanto a resistência, deformabilidade e condições hidráulicas. A Figura 6 mostra a realização do ensaio de piezocone (CPTu) no aterro teste. Durante execução não foi observado nível freático, portanto teste de dissipação não foi necessário.



Figura 6 - Ensaio CPTu executado no aterro experimental no ramo úmido.

Por fim, os parâmetros obtidos foram utilizados na análise de estabilidade de uma pilha de rejeitos, permitindo verificar o desempenho da estrutura e a aderência das premissas adotadas às condições de segurança previstas em projeto. As simulações foram realizadas no software Slide2, utilizando o método de equilíbrio limite GLE/Morgenstern-Price e considerando cenários drenados, não drenados e pseudo-estáticos.

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização Física

Para a pista com camadas de 30 centímetros, a massa específica dos grãos, os valores medidos obtidos na primeira campanha tiveram uma média de 3,08 g/cm³ nas amostras ensaiadas na segunda campanha de 3,04 g/cm3. A Figura 7 traz os resultados da granulometria do material ensaiado, caracterizando o rejeito como areno-siltoso. Os limites granulométricos superior e inferior representam a faixa de variação granulométrica do rejeito gerado na mina estudada e constituem o cenário denominado caso base.

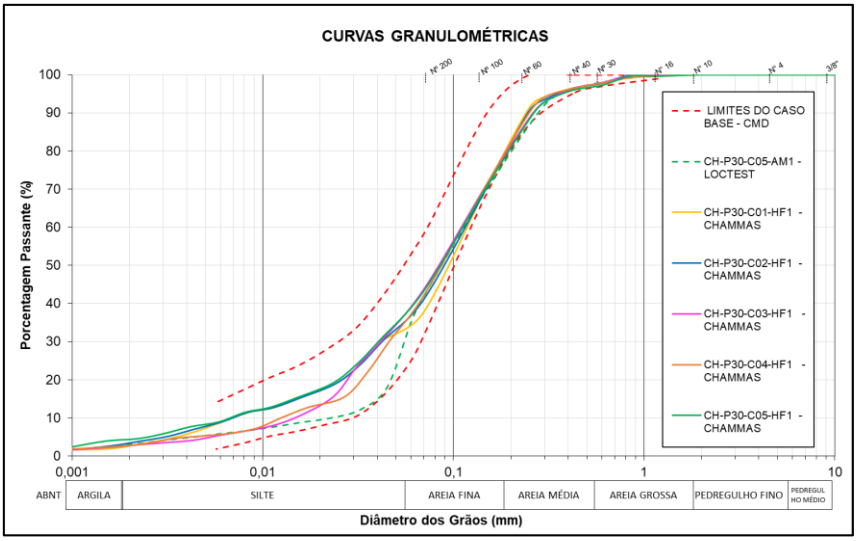


Figura 7 - Curvas granulométricas – Pista 30 cm.

Para a pista com camadas de 60 centímetros, com relação a massa específica dos grãos, os valores medidos apresentaram uma média de 3,06 g/cm3 nas amostras ensaiadas na primeira campanha e de 2,97 g/cm3 nas amostras ensaiadas na segunda campanha. A Figura 8 traz os resultados da granulometria do material ensaiado, caracterizando o rejeito como areno-siltoso.

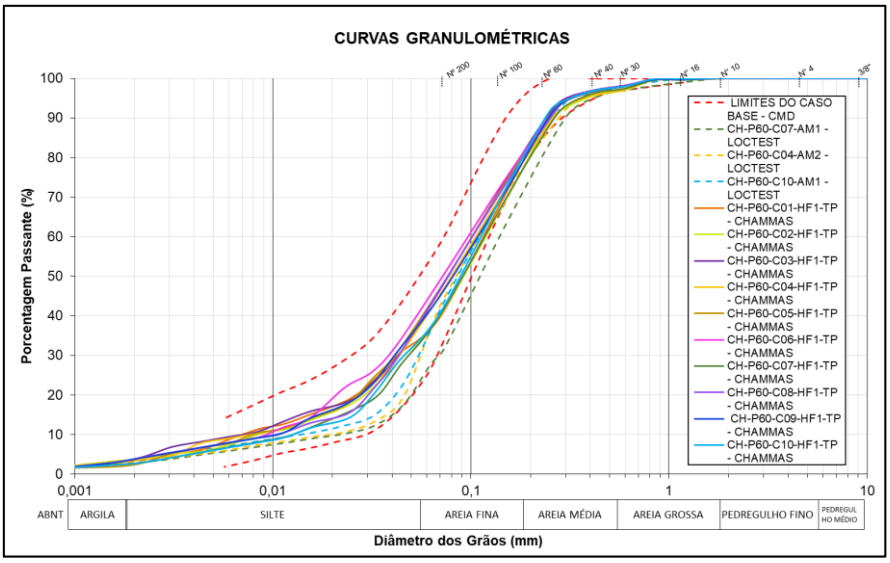


Figura 8 – Curvas granulométricas – Pista 60 cm.

O rejeito ensaiado não apresentou limites de Atterberg.

A Figura 9 apresenta os resultados do ensaio de Proctor Normal para pista de 30 cm.

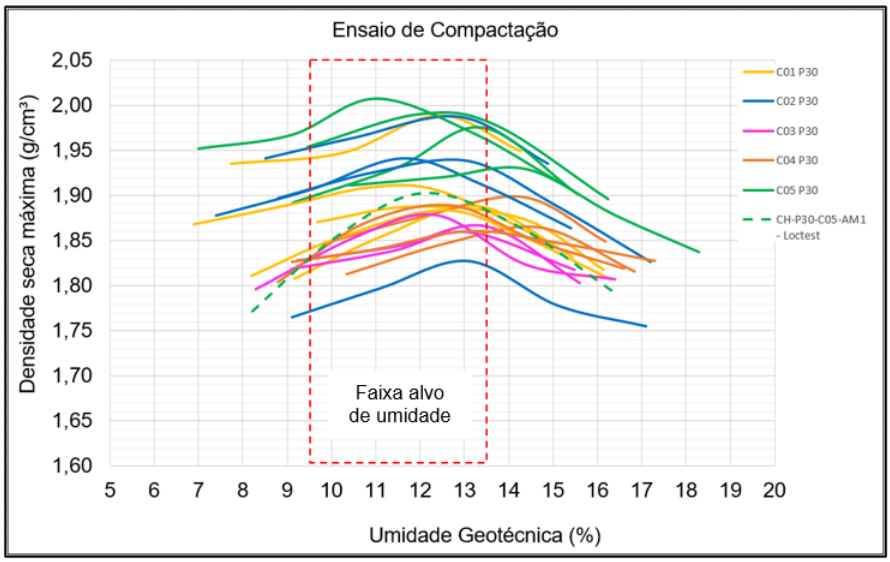


Figura 9 – Curvas de compactação – Pista 30 cm.

Observa-se que a densidade seca máxima obtida variou de 1,83 g/cm³ a 2,01g/cm³, apresentando valor médio de 1,91 g/cm³. Com relação à umidade ótima, foram encontrados valores de 11,0% a 14,0%, sendo alcançado um valor médio de 12,6%. A Figura 10 apresenta os resultados do ensaio de Proctor Normal para pista de 60 cm.

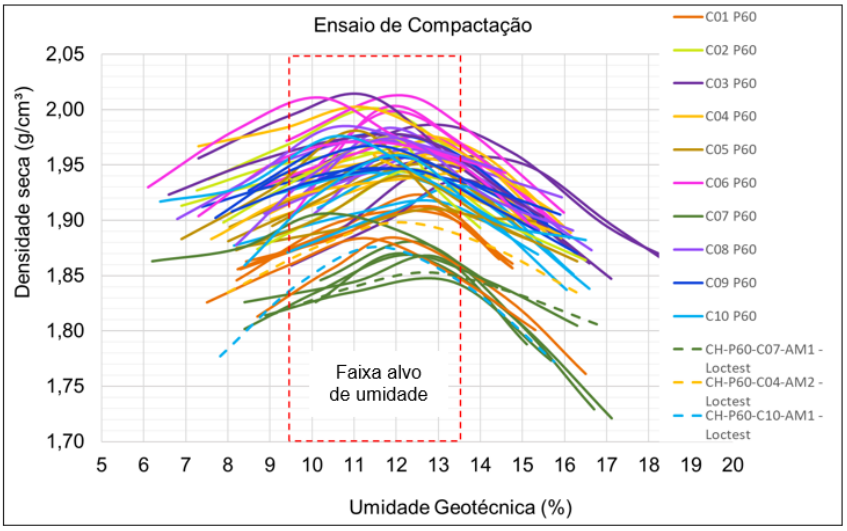


Figura 10 – Curvas de compactação – Pista 60 cm.

Observa-se que a densidade seca máxima variou de 1,85 g/cm³ a 2,01 g/cm³, apresentando valor médio de 1,95 g/cm³. Com relação à umidade ótima, foram encontrados valores de 10,1% a 13,7%, sendo alcançado um valor médio de 12,0%.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade realizados no rejeito testado no Aterro Experimental foram obtidos a partir dos blocos indeformados retirados nas pistas com camadas de 30 cm e 60 cm. Na Tabela 1 são apresentados os resultados de permeabilidade horizontal e vertical na Pista 30 cm.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de permeabilidade vertical (Kv) e horizontal (Kh) – Pista com camadas de 30 centímetros.

Camada	Pista	Nomenclatura	w (%)	e bloco	γ_d (g/cm³)	Kv (cm/s)	Kh (cm/s)
5	30 cm	CH-P30-C05-AM1	12,4	0,60	1,93	4,20E-06	-
			15,7		1,94	-	6,30E-06

A ordem de grandeza observada nos ensaios de permeabilidade (10-06 cm/s) foram consistentes com a granulometria areno-siltosa indicada nos ensaios de caracterização. Na Tabela 2 são apresentados os resultados de permeabilidade horizontal e vertical na Pista 60 cm, no Aterro Experimental.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de permeabilidade vertical (Kv) e horizontal (Kh) – Pista com camadas de 60 centímetros.

Camada	Pista	Nomenclatura	w (%)	e_{bloco}	ϱ_d (g/cm³)	Kv (cm/s)	Kh (cm/s)
4	60 cm	CH-P60-C04-AM1	14,2	0,58	1,84	8,40E-06	-
			14,0		1,81	-	1,80E-05
7		CH-P60-C07-AM1	14,1	0,62	1,80	8,70E-06	-
			13,6		1,80	-	1,50E-05
10		CH-P60-C10-AM1	13,6	0,61	1,87	3,60E-06	-
			14,0		1,81	-	1,80E-05

Conforme mostra a Tabela 2, a faixa dos coeficientes de permeabilidade vertical das amostras indeformadas da Pista 60 cm variaram de 3,6x10-06 cm/s a 8,4x10-06 cm/s, com média de 6,9x10-06 cm/s. Com relação aos coeficientes de permeabilidade horizontal, foram encontrados valores entre 1,5x10-05 cm/s a 1,8x10-05 cm/s, com média de 1,70x10-05 cm/s. Deste modo, verifica-se uma faixa de permeabilidade característica do rejeito parcial (10-05 a 10-06 cm/s).

Todas as camadas com espessura de 30 cm foram compactadas no ramo úmido, apresentando umidades pré-compactação entre 14,0% e 17,0% e umidades pós-compactação variando de 13,4% a 17,3%. As cinco camadas executadas foram identificadas como C1, C2, C3, C4 e C5, seguindo a sequência construtiva do aterro. A Figura 11 apresenta os valores de umidade pós-compactação determinados pelo método do cilindro biselado. Para a execução da compactação, foi empregado um rolo liso de 20 tf, aplicando-se quatro passadas, correspondentes a duas coberturas completas da pista (duas fechas).

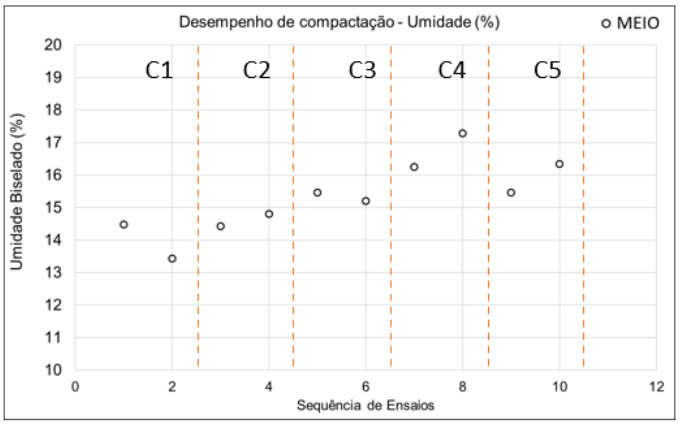


Figura 11 – Umidade de compactação Pista 30 cm.

Na pista de 60 cm, foram executadas dez camadas com espessura nominal de 60 cm, denominadas C1 a C10. Todas as camadas foram compactadas no ramo úmido, sendo a umidade prévia variando entre 12,8% e 18% e a umidade pós compactação entre 11,5% e 19,3% conforme apresentado na Figura 12. Observa-se uma variação nos ranges de umidade obtidos para a pista de 60 cm, isso ocorreu devido à dificuldade encontrada para umectação do material com espessuras superiores à 30

cm. Para compactação da pista, foi utilizado o rolo liso de 20 tf, sendo executado 6 passadas (3 fechas).

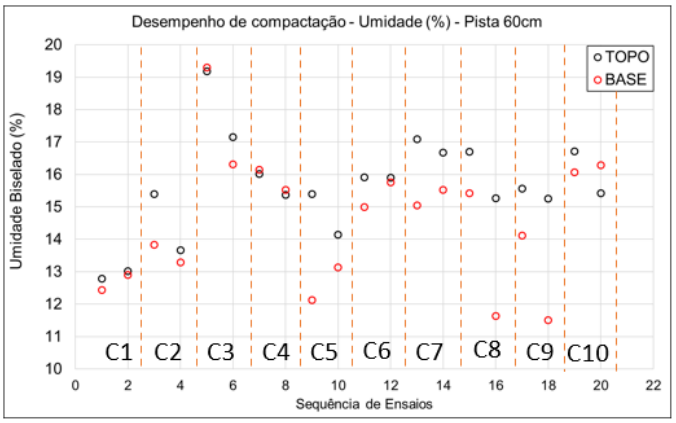
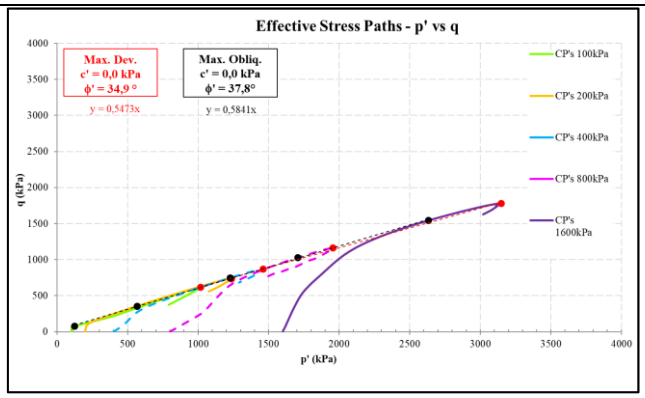


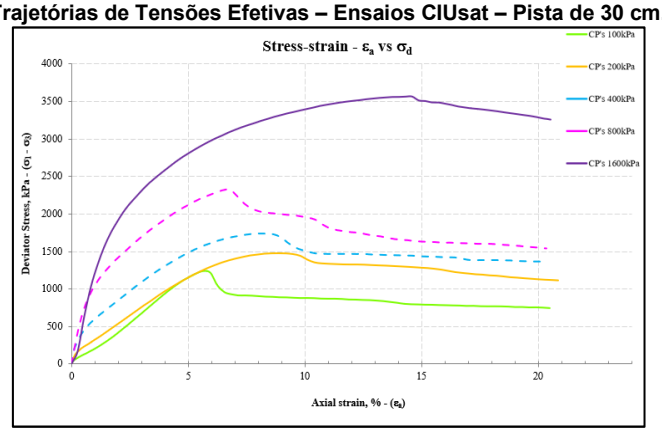
Figura 12 – Umidade de compactação Pista 60 cm.

4.2 Ensaios Triaxiais

Foram observados nos gráficos de tensão x deformação curvas com picos suaves, porém, esperados em materiais compactos. Nas trajetórias de tensões (p' x q) todos os ensaios tiveram comportamento dilatante, sempre caminhando no sentido da direita. Com relação a geração de poropressão, observa-se que em todos os corpos de prova dos ensaios não drenados, ocorre a geração de poropressão negativa, condizente com o comportamento dilatante observado no gráfico p' x q. Com relação a variação volumétrica, observa-se que as amostras dilataram nos ensaios drenados e foram condizentes com o comportamento dilatante observado nos ensaios consolidados e não drenados. Os ensaios triaxiais para a camada de 60 cm, considerando o índice de vazios até 0,64, todos os ensaios mostraram um comportamento dilatante e com excesso de poropressão negativa, comportamentos que são necessários para um bom desempenho da pilha. As Figuras 13 e 14 mostram a trajetória de tensões efetivas e o comportamento tensão deformação das camadas de 30 cm e 60cm respectivamente.

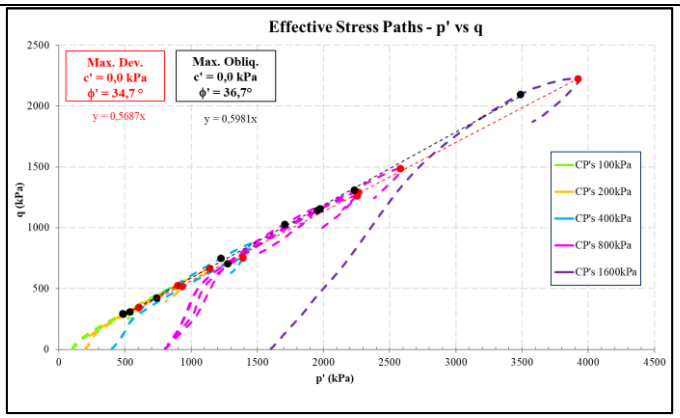


Trajetórias de Tensões Efetivas – Ensaios CIUsat – Pista de 30 cm.

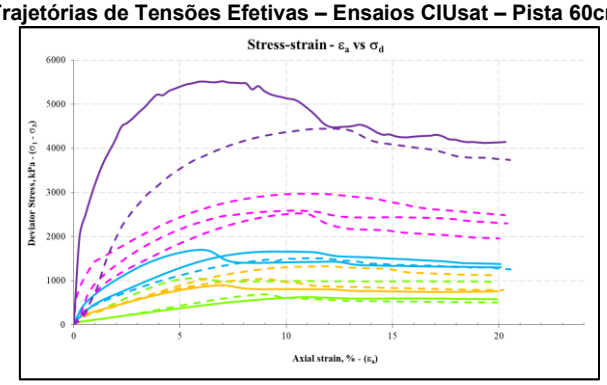


Curvas tensão vs deformação – Triaxiais CIU – Pista de 30 cm.

Figura 13 – Resultados ensaio triaxial não drenado Pista 30 cm.



Trajetórias de Tensões Efetivas – Ensaios CIUsat – Pista 60cm.



Curvas tensão vs deformação – Triaxiais CIU – Blocos Pista de 60 cm

Figura 14 – Resultados ensaio triaxial não drenado Pista 60 cm.

4.3 Instrumentação Piezométrica (PZE)

O instrumento foi configurado para aquisição automática de dados em intervalos de 30 segundos. Conforme apresentado na Figura 15, observou-se que, nas condições iniciais de instalação, quando o material ao redor do piezômetro se encontrava saturado, o tráfego de equipamentos durante a construção das camadas superiores provocava incrementos de poropressão. Os maiores incrementos foram registrados durante a execução da camada imediatamente superior àquela em que o instrumento foi instalado, evidenciando maior sensibilidade aos carregamentos nessa etapa construtiva. Esse comportamento não foi observado nas camadas subsequentes.
Verifica-se ainda, na Figura 15, que os eventos de basculamento, espalhamento e compactação resultavam em elevações transitórias de poropressão, seguidas de dissipação até a ocorrência de um novo ciclo operacional. Esse padrão repetiu-se até a execução da Camada 5, correspondente a aproximadamente três camadas acima da posição do piezômetro.
A partir da instalação da quinta camada, totalizando cerca de 2,40 m de aterro acima do instrumento, não foram mais observados incrementos significativos de poropressão associados aos carregamentos construtivos, sendo registrada apenas sua dissipação gradual. Esse comportamento está relacionado à redução progressiva da condição de saturação do material ao redor do piezômetro ao longo do tempo, o que diminuiu sua suscetibilidade à geração de poropressões em resposta aos carregamentos sucessivos impostos pela construção do aterro.

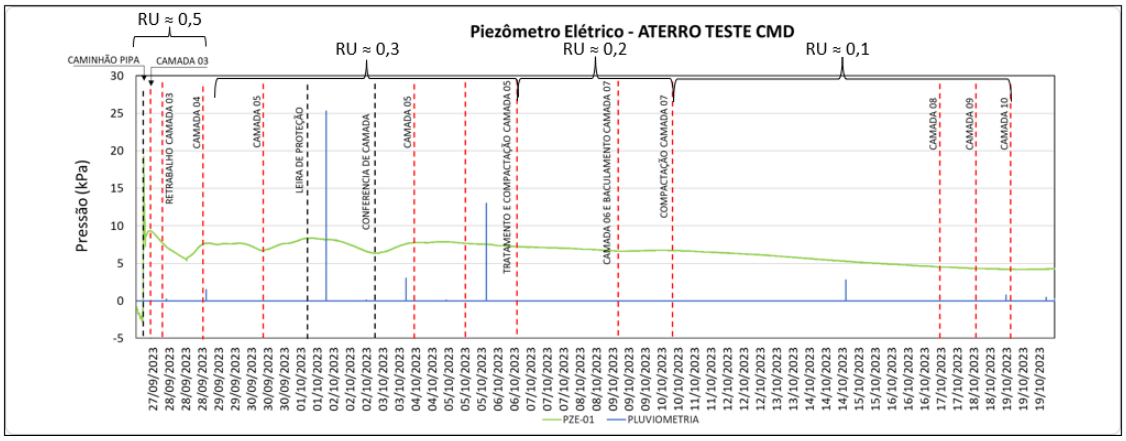


Figura 15 – Histórico de leituras de poropressões do instrumento PZE-TESTE – Pista de 60 cm.

4.4 Piezocone (CPTu)

Os resultados dos ensaios CPTu indicam, de modo geral, bom desempenho geotécnico das camadas compactadas, com resistências de ponta superiores a 20 MPa em ambas as pistas. Na pista de 30 cm, os ensaios confirmaram elevada rigidez do material, sendo interrompidos antes de 6 m devido à impenetrabilidade, além de apresentarem perda de umidade em razão do intervalo de aproximadamente 30 dias entre a execução e os ensaios. Observou-se geração pontual de poropressão associada a questões operacionais, sem impacto na resistência medida. Na pista de 60 cm, verificou-se comportamento semelhante, com ganho progressivo de resistência em profundidade e valores elevados de resistência de ponta. Uma redução

localizada foi observada em camada compactada com maior umidade e menor controle construtivo, próximo à rampa de acesso. Também foram registradas variações pontuais de poropressão sem reflexos relevantes na resistência. De forma geral, os resultados demonstram consistência entre os ensaios e confirmam o bom desempenho do rejeito compactado, independentemente da espessura das camadas. As Figuras 16 e 17 trazem os resultados nas camadas de 30 e 60 cm, respectivamente.

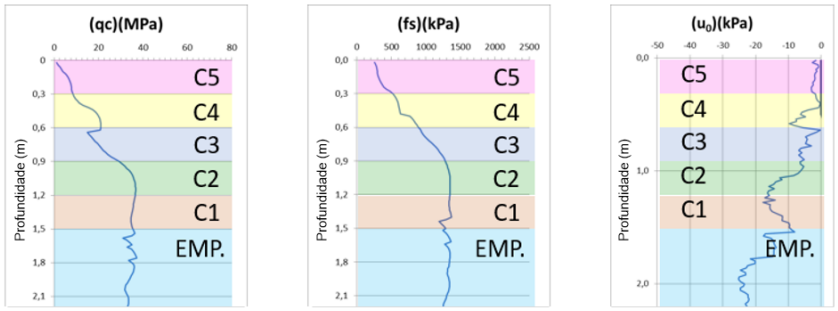


Figura 16 – Ensaios CPTu – Pista de 30cm.

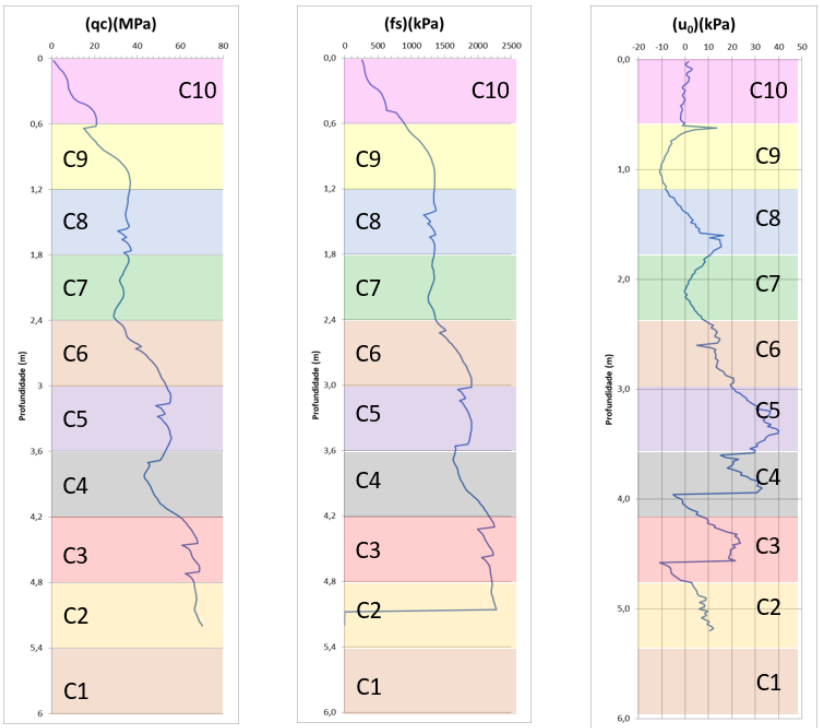


Figura 17– Ensaios CPTu – Pista de 60 cm.

4.5 Análise de estabilidade estrutura hipotética

Para fim de avaliação de estabilidade de uma estrutura hipotética considerou uma pilha com bermas de 8 metros de largura, banco de 10 metros de altura, ângulo de 21º de banco e tensões confinantes até 800 kPa. Com base nas características dessa estrutura e aplicando-se da metodologia proposta por Hynes-Griffin and Franklin

(1984), determinou-se o PGA como 0,15g e os coeficientes de aceleração sísmica a seguir, kh=0,075g e kv=0,05g, para análises pseudo-estáticas.

Os cenários e critérios adotados nas análises de estabilidade, com os respectivos fatores de segurança mínimos (FSmin), são apresentadas na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Cenários de análise de estabilidade considerados e fatores de segurança mínimos admissíveis, conforme normas de referência.

Análise	**$FS_{mínimo}$**	**Condição de nível d'água**	**Condição de parâmetro**	
			Rejeito	**Demais Litotipos (Fundação)**
Drenada	1,5	NA Normal (Análise de percolação)	Resistência por tensões efetivas	Resistência por tensões efetivas
	1,3	NA extremo	Resistência por tensões efetivas	Resistência por tensões efetivas
Não drenada	1,3	NA Normal	Não se aplica	Resistência não drenada
Pseudo-estática	1,1	NA Normal	Resistência Tensões efetivas	Resistência não drenada

As Figuras 18 e 19 mostram os resultados das análises drenada e pseudoestática, respectivamente, da seção hipotética estruturada com uma zona interna compactada no ramo úmido (até 15,5%) e uma zona externa de 20 metros compactada na faixa alvo (até 13,5%). De forma geral, observou-se uma boa performance da seção estudada. Para trabalhos futuro, sobretudo em níveis de tensões mais elevados, sugere-se novas avaliações considerando modelos hidromecânicos acoplados com tensão deformação, além de avaliações dinâmicas e/ou pseudo-dinâmicas. Para estruturas de pequeno porte e com base na avaliação continuada de poropressões, entende-se que a resposta desse estudo é satisfatória.

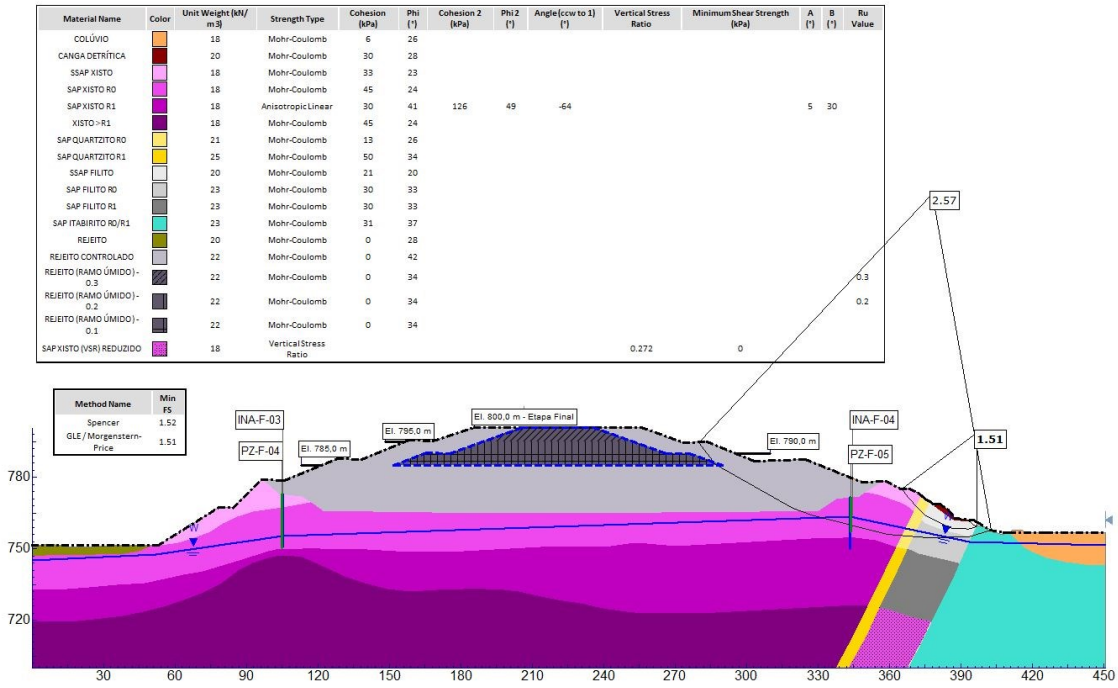


Figura 18 – Seção com buffer de 20 m – Análise Drenada.

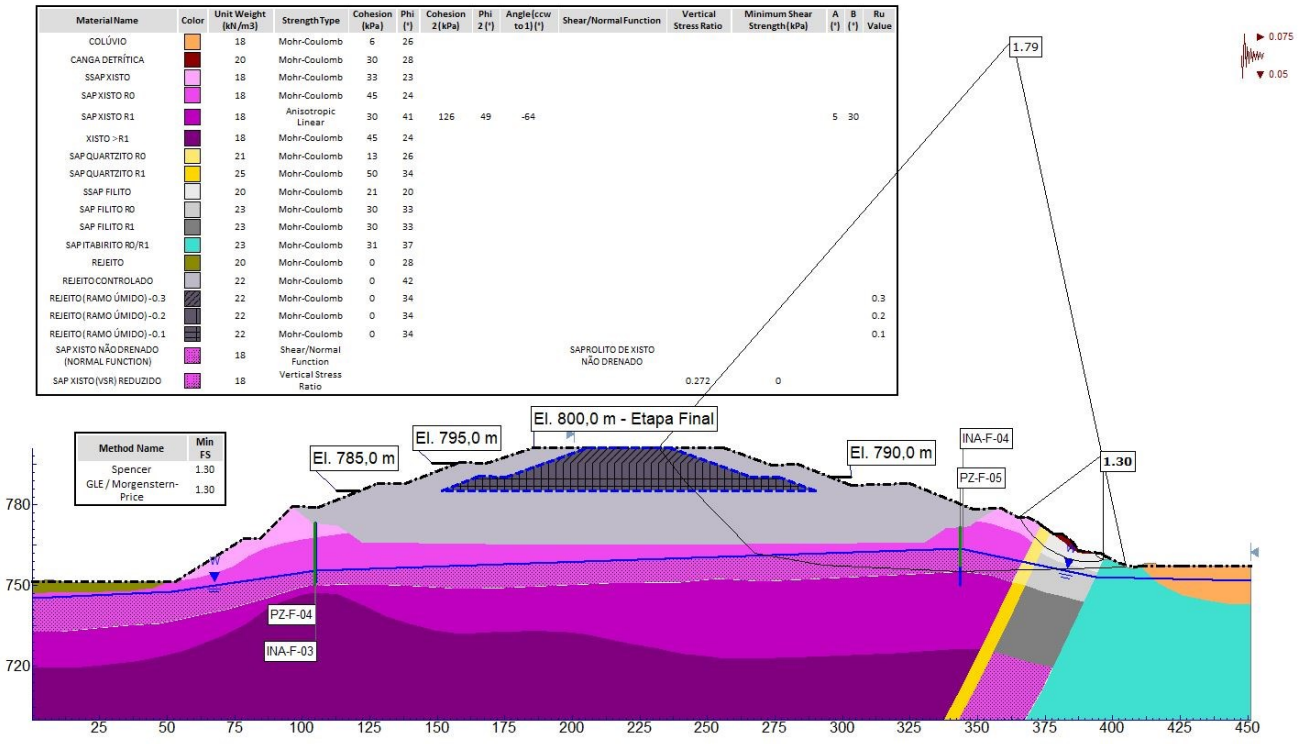


Figura 19 — Seção com Buffer 20 m – Análise Pseudoestática

5. CONCLUSÕES

Os estudos realizados para avaliação da disposição de rejeito filtrado no ramo úmido da pilha PDR demonstraram que a estratégia de zoneamento é tecnicamente viável, desde que observados critérios operacionais e de controle específicos.

A disposição no ramo úmido, com o zoneamento em região frontal e região interna (ramo úmido), mostrou-se adequada, sendo imprescindível a manutenção de um afastamento mínimo de 20 m entre essas regiões. Os controles operacionais adotados são, em sua maioria, equivalentes aos já praticados para a faixa alvo de umidade, destacando-se como principal diferença a ampliação da faixa admissível de umidade na Zona Interna, que passa a variar entre 13,5% e 15,5%, sem restringir a compactação de materiais com umidades inferiores dentro do intervalo convencional.

A presença de camadas classificadas como “borrachudo” e/ou eventual exsudação de água não se mostrou critério limitante para aceitação das camadas na Zona Interna, desde que acompanhada por controles adicionais, incluindo monitoramento com coletas indeformadas e validação por equipe técnica.

Do ponto de vista geotécnico, os resultados obtidos no aterro experimental indicaram desempenho satisfatório do rejeito parcial (90/10), com comportamento mecânico adequado em condições de umidade elevada. As camadas compactadas apresentaram resistência ao cisalhamento superior aos valores de projeto ($\phi' \approx 34°$ frente a 32°), estabilidade para tensões de confinamento de até 800 kPa e índices de vazios compatíveis com os critérios estabelecidos. Ensaios de campo, como CPTu, corroboraram o bom desempenho das camadas executadas.

O monitoramento por instrumentação geotécnica evidenciou resposta adequada dos piezômetros, com geração controlada e dissipação eficiente de poropressões, destacando a importância da instalação desses instrumentos, sobretudo na Zona Interna, para acompanhamento contínuo das condições da pilha.

Adicionalmente, as análises de amostras indeformadas confirmaram a consistência dos parâmetros obtidos em campo. As umidades de compactação avaliadas no estudo variaram aproximadamente entre 13,7% e 18%. Entretanto, a validação dos parâmetros geotécnicos foi estabelecida até o limite de 15,5%.

Dessa forma, os resultados obtidos no aterro experimental executado no ramo úmido mostraram-se consistentes e promissores, corroborando a viabilidade do zoneamento operacional da pilha PDR em zona externa (faixa-alvo) e zona interna (ramo úmido). A adoção dessa abordagem proporcionou ganhos significativos de flexibilidade operacional e eficiência construtiva, mantendo os requisitos de segurança geotécnica da estrutura e possibilitando um incremento de aproximadamente 85% na taxa de empilhamento durante o período chuvoso na mina estudada.

6. PALAVRAS-CHAVEErro! Indicador não definido.

Empilhamento de rejeitos filtrados; compactação; Ru; zoneamento

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

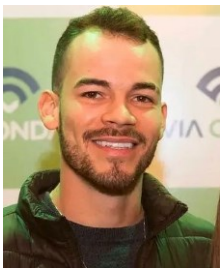
• [1] Almeida, M. S. S., et al. (2026). A geotechnical overview of Brazilian research: Toward sustainable tailings disposal. Soils and Rocks, 49(1).

• [2] Viana da Fonseca, A., Cordeiro, D., Molina-Gómez, F., et al. (2022). The mechanics of iron tailings from laboratory tests on reconstituted samples collected in post-mortem Dam I in Brumadinho. Soils and Rocks, 45(2), 1-20.

• [3] Li, H., Hinton, J., & Navarro, J. (2024). Farmed tailings stacking. In: Proceedings of the 26th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings (Paste 2024). Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 193-198.

• [4] Tito, L. A. A. (2020). Numerical Evaluation of One-Dimensional Large-Strain Consolidation of Mine Tailings. Master's Thesis, Colorado State University.

 Victor Bretas	**Victor BRETAS** Atualmente atua como RTFE (Gerente técnico de gestão de rejeitos) na Vale. Possui especialização em geotecnia pela UFPA (2022) e curso de aperfeiçoamento em sondagem e ensaios laboratoriais pela UFRJ/Coppe (2024). Formado em engenharia de minas pra UFOP (2014) e possui MBA pela FGV em projetos (2017) e gestão financeira e auditoria (2021).
 André Azevedo	**André AZEVEDO** Engenheiro Geotécnico da Vale desde 2019. Engenheiro Geotécnico na Vale desde 2019. Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (2019), possui especialização em Engenharia Geotécnica pela Fundação Gorceix (2021), mestrado em Engenharia Geotécnica pela Universidade Federal de Ouro Preto (2025) e especialização em Inteligência Artificial Generativa e Large Language Models (LLMs) pela PUC-Rio (2025).
 Edilaine Ribeiro	**Edilaine RIBEIRO** Graduada em Engenharia de Minas pela UEMG, com especialização em Geotecnia aplicada à mineração pela Fundação Gorceix. Atua na Vale desde 2005, com experiência em tratamento de minério e geotecnia de barragens. Atualmente integra a geotecnia operacional, com foco em monitoramento e inspeção de taludes e empilhamento de rejeito filtrado.



Tiago Silva

Tiago SILVA

Bacharel em Engenharia de Minas pela Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) e Técnico em Mineração pelo Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto. Possui 9 anos de experiência no setor mineral, atuando atualmente como Analista de Geotecnia. Destaca-se pela sólida atuação em geotecnia de cava e hidrogeologia, bem como na gestão de pilhas de estéril e rejeitos, acumulando 7 anos de experiência concentrada nessas especialidades.



Cayke dos Santos

Cayke DOS SANTOS

Engenheiro Civil com especialização em Geotecnia, graduado pelo Centro Universitário AlfaUnipac e com pós-graduação em Engenharia Geotécnica pela PUC Minas. Atualmente, atua no acompanhamento técnico-construtivo de projetos de empilhamento de rejeito filtrado, com ênfase na fiscalização de obras, controle tecnológico e verificação da conformidade com os requisitos de projeto.

SEMANA DE BARRAGENS 2026
DAMSWEEK 2026

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Relatório GE-3 Aspectos e práticas ambientais no projeto, construção e operação de barragens de acumulação de água

Engº Enio Fonseca
Conselheiro do Fórum de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentavel do Setor Elétrico FMASE
CEO Pack of Wolves Consultoria Estratégica



Seminário Socioambiental Hidrelétrico

"Panorama regulatório e legislativo para o setor de geração hidrelétrica"

Enio Fonseca, Vice-presidente- FMASE

FÓRUM DE MEIO AMBIENTE DO SETOR ELÉTRICO

SEMINÁRIO Desafios da Geração de Energia Elétrica no Brasil

FÓRUM DE MEIO AMBIENTE DO SETOR ELÉTRICO

"SEMINÁRIO "DESAFIOS DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL"

PAINEL 3: Licenciamento Socioambiental de Empreendimentos de Geração

Enio Fonseca
Presidente - FMASE

Promoção: ANEEL

Brasília, 19 de outubro de 2017.

CIGB ICOLD CBDB

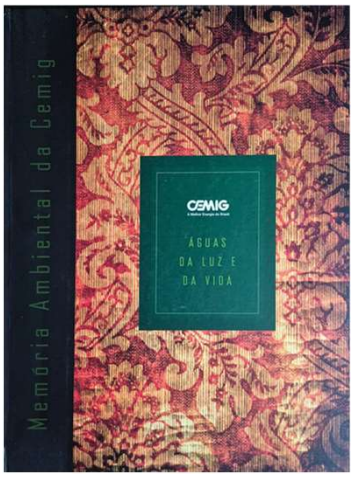
COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS

www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609

UHE São Simão 1973/1978

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS







UHE Nova Ponte 87/94





CIGB
ICOLD
CBDB

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609

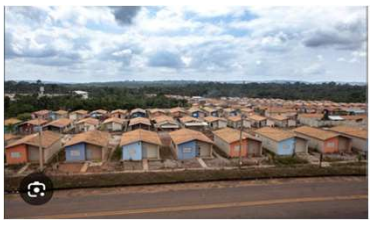
UHE Belo Monte 2011/2019

I SIMPÓSIO SOBRE
GRANDES
ESTRUTURAS
GEOTECNICAS









UHE Irapé 2002/2006





UHE Tres Gargantas 1992/2012





Barragem de Salinas 1990/1991

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS







CIGB ICOLD CBDB

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS

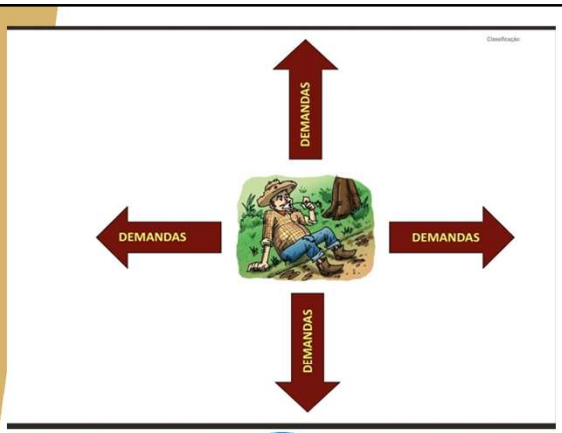
www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609



CIGB ICOLD CBDB

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS

www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609





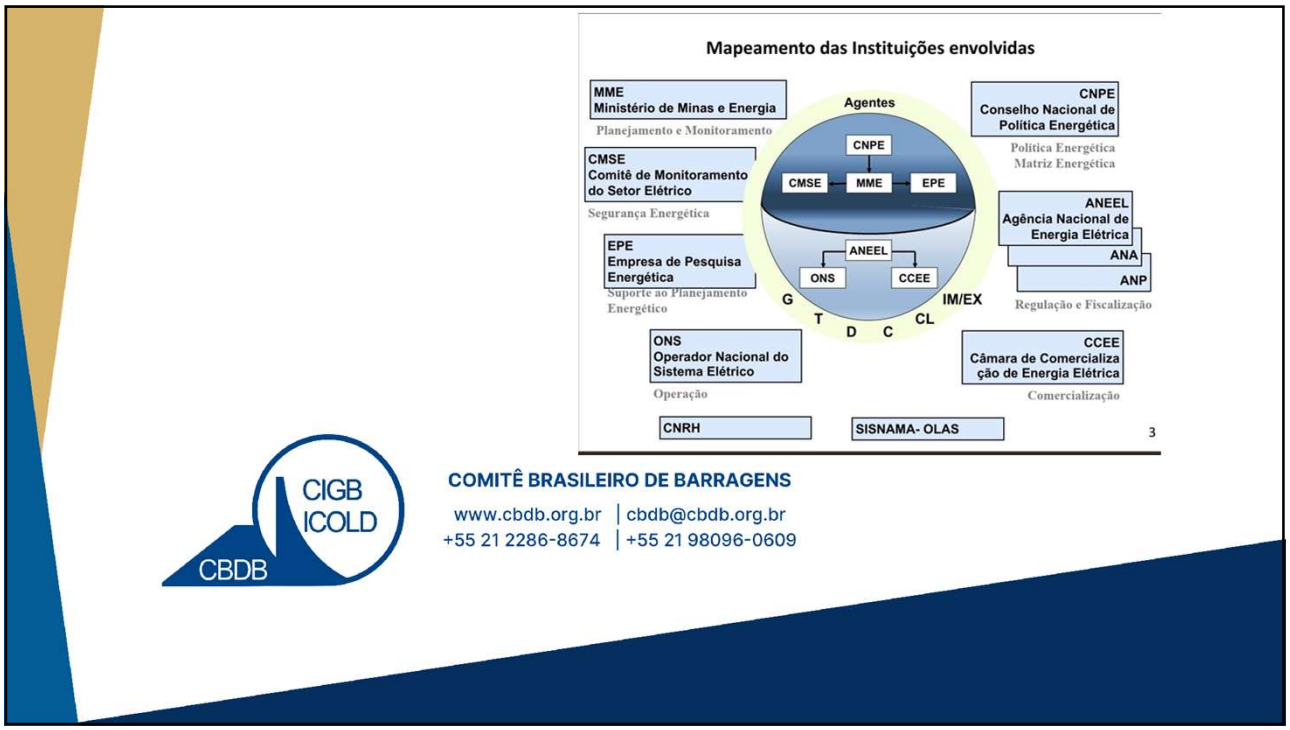
CIGB ICOLD CBDB

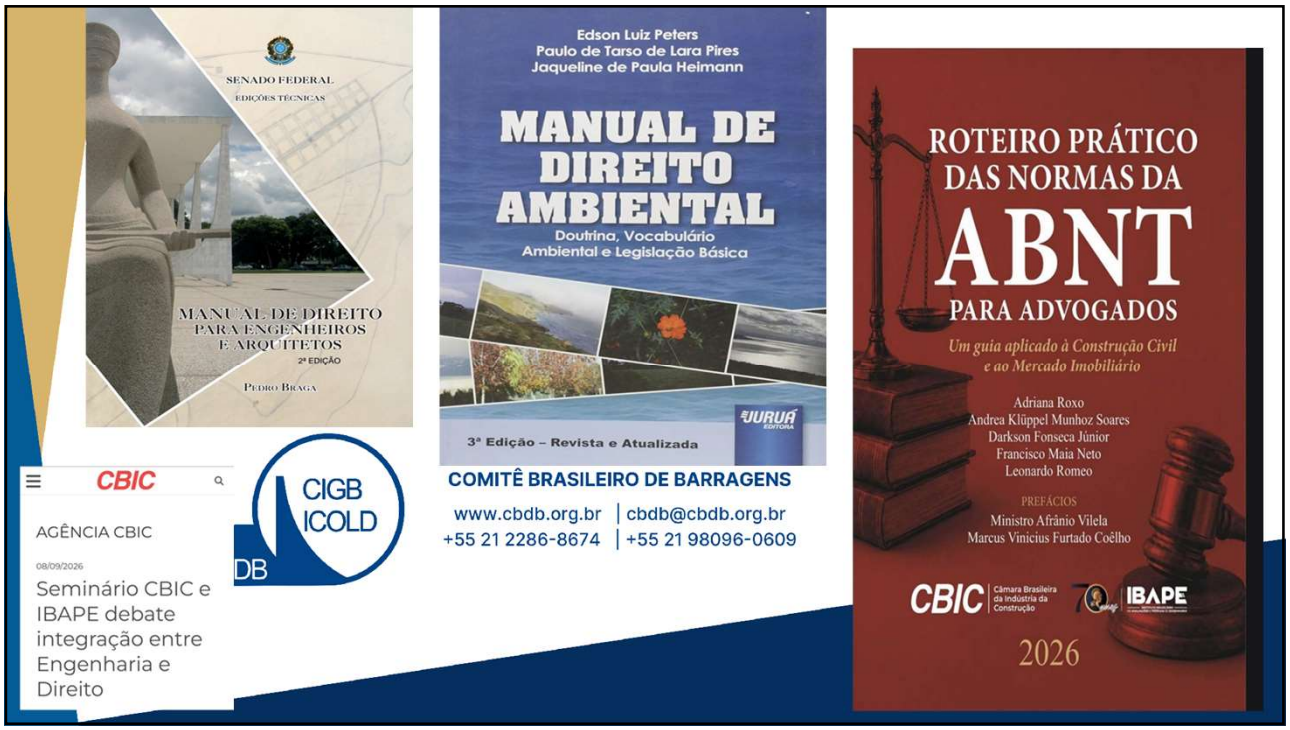
COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS

www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609


Conformidade Socioambiental
Made with AI
Empreenedor
Órgãos Ambientais
Poder Público
Poder Publico Local
Poder Judiciário
Atingidos
Órgãos de Controle
Igreja e Instituições Religiosas
Universidades e Centros de Pesquisa
Poder Legislativo
Comunidades Tradicionals e Indigenas
Sindicatos e Associaçóss
Imprensa e Midia
Poder Legislativo
Ambientalistas
Empresas Contratadas
Financiadores e Bancos


USINA HIDRELÉTRICA E NORMAS LEGAIS
+ SEGURANÇA DE BARRAGENS
Made with AI
JUDICIALIZAÇÃO CLIMÁTICA
CLIMATE LITIGATION
MUDANÇAS CLIMÁTICAS
IMPACTOS AMBIENTAIS
LEGISLAÇÃO TRABALHISTA E SOCIAL
OIT 169
CONVENCÃO COBRE POVOS INDÍGENAS
LICENCIAMENTO AMBIENTAL
SEGURANÇA DE BARRAGENS
INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO
RÉGULACÃO DO SETOR ELÉTRICO
MONITORAMENTO DE BARRAGENS
PLANOS DE EMERGÊNCIA
CUMPRIMENTO DE NORMAS E REGULAMENTOS


Mapeamento das Instituições envolvidas
MME
Ministério de Minas e Energia
Planejamento e Monitoramento
CMSE
Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
Segurança Energética
EPE
Empresa de Pesquisa Energética
Suporte ao Planejamento Energético
ONS
Operador Nacional do Sistema Elétrico
Operação
CNRH
SISNAMA- OLAS
Agentes
CNPE
CMSE
MME
EPE
ANEEL
ONS
CCEE
G
T
D
C
CL
IM/EX
CNPE
Conselho Nacional de Política Energética
Política Energética
Matriz Energética
ANEEL
Agência Nacional de Energia Elétrica
ANA
ANP
Regulação e Fiscalização
CCEE
Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
Comercialização
3
CIGB
ICOLD
CBDB
COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609


SENADO FEDERAL
EDIÇÕES TÉCNICAS
MANUAL DE DIREITO PARA ENGENHEIROS E ARQUITETOS
2ª EDIÇÃO
PEDRO BRAGA
CBIC
AGÊNCIA CBIC
08/09/2026
Seminário CBIC e IBAPE debate integração entre Engenharia e Direito
CIGB
ICOLD
DB
Edson Luiz Peters
Paulo de Tarso de Lara Pires
Jaqueline de Paula Heimann
MANUAL DE DIREITO AMBIENTAL
Doutrina, Vocabulário Ambiental e Legislação Básica
3ª Edição – Revista e Atualizada
JURUÁ EDITORA
COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609
ROTEIRO PRÁTICO DAS NORMAS DA ABNT PARA ADVOGADOS
Um guia aplicado à Construção Civil e ao Mercado Imobiliário
Adriana Roxo
Andrea Klüppel Munhoz Soares
Darkson Fonseca Júnior
Francisco Maia Neto
Leonardo Romeo
PREFÁCIOS
Ministro Afrânio Vilela
Marcus Vinicius Furtado Coêlho
CBIC
Câmara Brasileira da Indústria da Construção
IBAPE
2026



CIGB ICOLD CBDB

Darwinismo Climático: Adaptação Já!



Enio Fonseca
Decio Michellis Jr.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS

www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609





SEWORLD – SETOR ELÉTRICO NO MUNDO - CARTA
8º FÓRUM MUNDIAL DA ÁGUA – Brasília, 22/03/2018
SIDE EVENT - RESERVATÓRIOS, UMA QUESTÃO DE SEGURANÇA HÍDRICA

A água é um elemento essencial à vida e ao desenvolvimento de diversas atividades humanas. A crescente utilização para diversos fins como indústria, produção agropecuária, geração de energia, consumo doméstico, entre outros, observado ainda os efeitos climatológicos, tem feito com que a disponibilidade hídrica não esteja sendo suficiente para atender as demandas e, ainda, manter as condições ambientais mínimas para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental em muito dos espaços territoriais das bacias hidrográficas, vivenciando-se, nesse momento, uma situação de escassez hídrica, a qual já está evidenciada em diversas bacias hidrográficas do Brasil.

Em boa parte do país, o período de chuvas, chamado de período úmido, dura em torno de seis meses, começando em novembro e terminando em abril, por consequência, os demais sete meses de pouca chuva formam o período seco. Além dessa variação anual das chuvas, com meses úmidos e secos, há uma outra variável que consiste num bloco de anos consecutivos com chuvas acima da média, seguido por um outro bloco com chuvas abaixo da média. No Brasil esses ciclos têm, em média, oito anos.

Dessa forma, existem situações em que a disponibilidade hídrica natural, verificadas nas vazões disponíveis, não é suficiente para suprir as demandas, havendo então a necessidade de aumentar essa disponibilidade pelo aproveitamento do potencial de regularização de vazão nos cursos d'água, através da construção de reservatórios de acumulação.

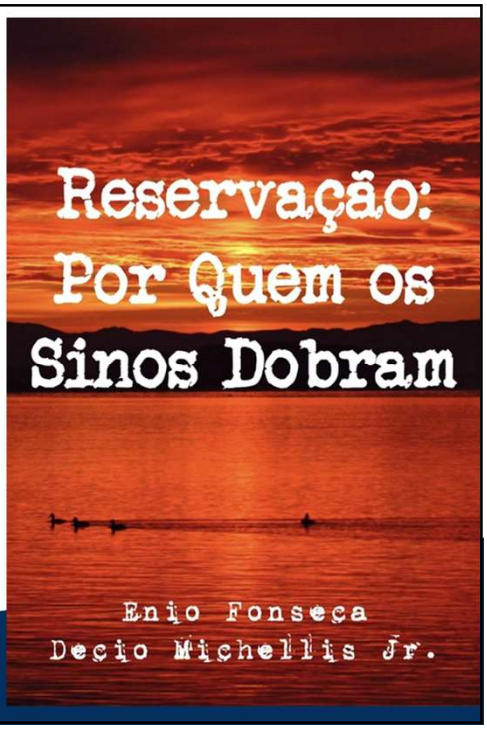
ORGANIZAÇÃO

FÓRUM DE MEIO AMBIENTE DO SETOR ELÉTRICO · ABRAGEL · ABRAPCH

CIGB ICOLD CBDB

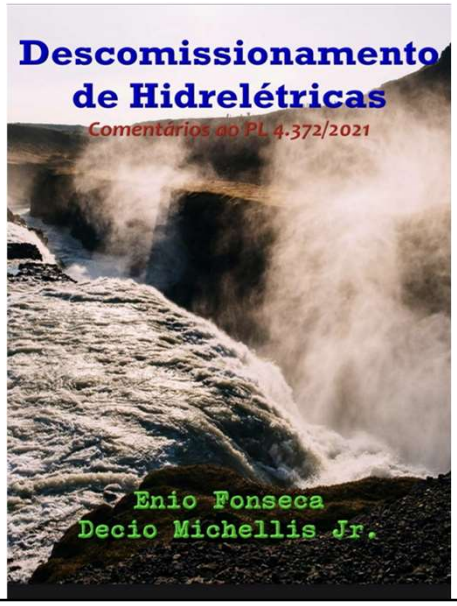
COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS

www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609



Descomissionamento de UHEs
PL 4.372/2001
Atual CMADS.
Depois :
CME.CCJC.Plenario.
Senado

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS



PCH Pandeiros 1953/1957 (2008)

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS









CIGB ICOLD CBDB

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609

Obrigado.

eniofon@gmail.com

31 999530271

CIGB ICOLD CBDB

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609


CIGB
ICOLD
CBDB
COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

SEMANA DE BARRAGENS 2026 DAMSWEEK 2026

Obras associadas a Grande Estruturas Geotécnicas: Cuidado integrado à paisagem

Relator: Jonilton Paschoal

Relator

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

- **Nome: Jonilton Paschoal**
- **Formação acadêmica e ano de conclusão:**
  - Graduação em Engenharia Ambiental | UEPA | 2006
  - MBA em Auditoria, Perícia e Gestão Ambiental | Faculdade Oswaldo Cruz | 2013.
- **Empresa/Organização: Mineração Paragominas S.A**
- **Cargo atual: Gerente de Meio Ambiente**
- **Experiencia Profissional:** Engenheiro Ambiental com cerca de 20 anos de experiência profissional, com atuação no órgão ambiental do Estado do Pará e ampla experiência no setor de mineração de caulim e bauxita. Possui trajetória em gestão ambiental, licenciamento ambiental e auditoria, incluindo experiência na gestão ambiental aplicada às operações de mineração.

1- Introdução

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS



Visão geral da Hydro

Empresa líder em alumínio e energia renovável

Hydro Alumínio

- Bauxita & Alumina
- Alumínio metálico
- Extrusão
- Reciclagem

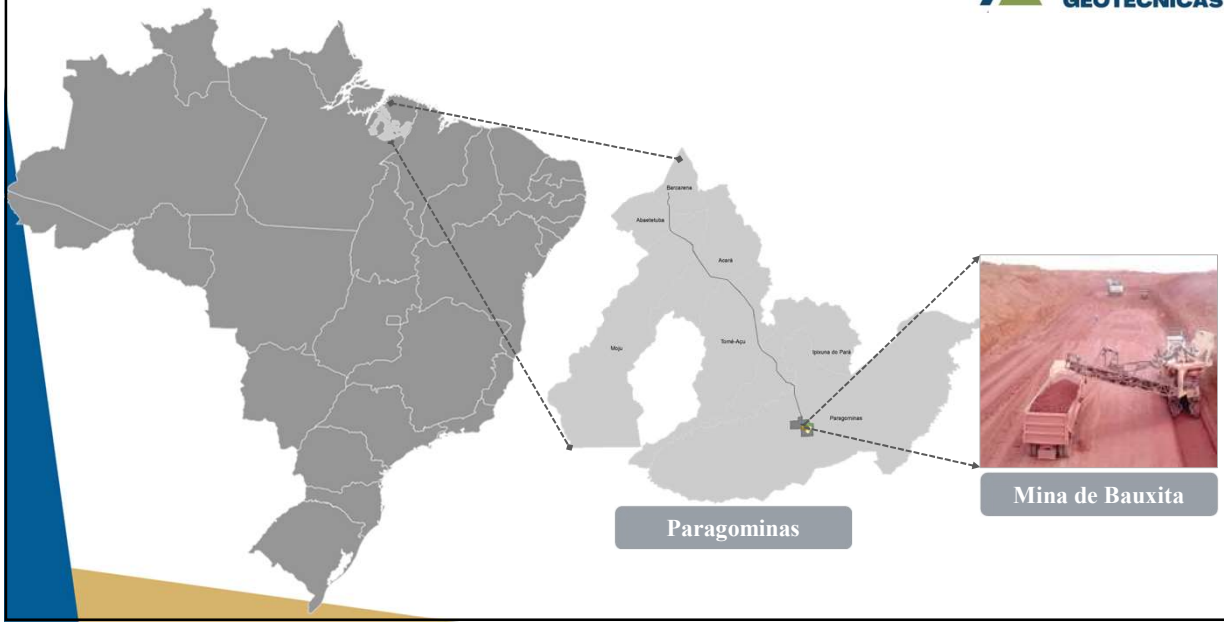
Hydro Energia

- Hidrelétrica
- Solar
- Eólica
- Baterias
- H_2 Hidrogênio

- **120 anos de história**
- **Presente em 40 países**
- **32 mil colaboradores**

1- Introdução

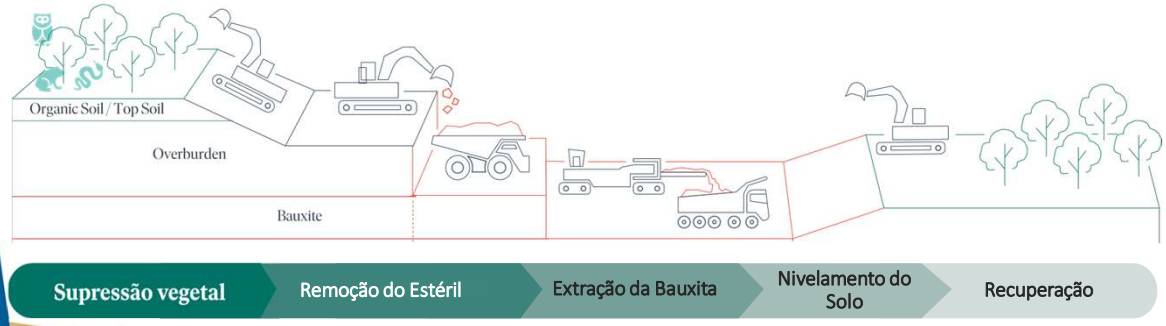
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS



1- Introdução

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

A lavra de bauxita é realizado a céu aberto.



Supressão vegetal | Remoção do Estéril | Extração da Bauxita | Nivelamento do Solo | Recuperação

1- Introdução

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS



Mineração Paragominas - Paragominas - Pará
Barragem do vale (valley area)



1 Introdução



Barragem do Vale



Área de Empréstimo



Voçoroca

Planejamento estratégico CBDB

Compromisso com a sustentabilidade sócio-ambiental

Obrigação da Entidade de, utilizando os melhores conhecimentos e ***técnicas****, zelar pela maximização de benefícios e a* ***mitigação dos impactos sociais e ambientais*** *decorrentes da construção de barragens e* ***obras associadas****, de modo a assegurar no momento presente os recursos necessários às gerações futuras.*

Fonte: https://cbdb.org.br/planejamento-estrategico

CIGB ICOLD CBDB

Comitê Brasileiro de Barragens

Objetivo

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Quais os requisitos da técnica?

Hydro

- Menor intervenção ambiental
- Estabilização do terreno de forma efetiva
- Controle do processo erosivo de forma ativa
- Estabilização do local para o período chuvoso
- Baixa/nula utilização de concreto (Descarbonização)
- Financeiramente viável

Objetivo

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Sua estrutura se integra à Natureza. Acelerando a Recuperação Ecológica

Menor intervenção e reduzida remoção Vegetal

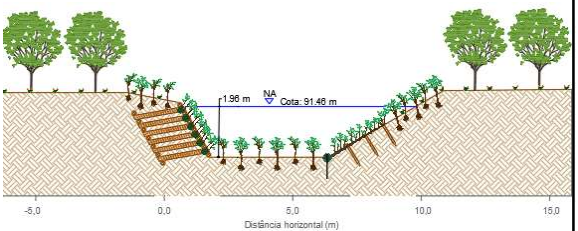
Sem a necessidade de utilizar concreto.

Hydro

Comumente Utilizado em países da Europa

Principalmente em países com alto índice de chuvas.

A Técnica da Engenharia Natural!





Seleção da Técnica

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Engenharia Civil Convencional

Reconformação intensa de taludes – risco de intensificação dos processos erosivos existentes

Uso de revestimentos de concreto, sacos de solo-cimento, entre outros.

Engenharia Natural

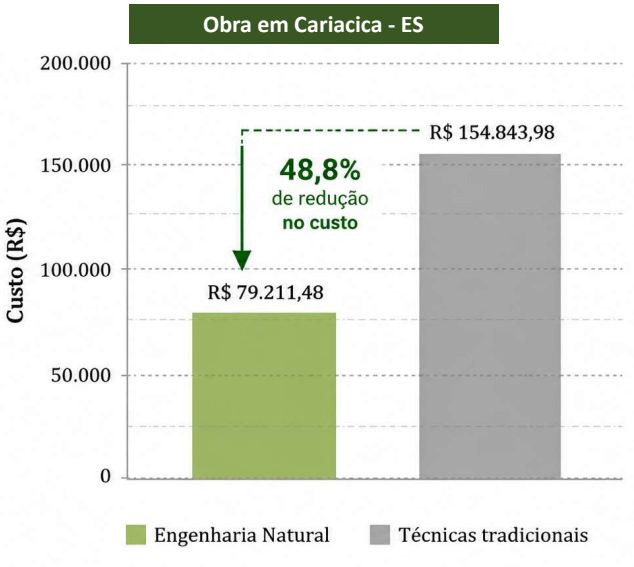
Uso de materiais construtivos vivos (sementes, plantas, partes de plantas, entre outros).

Aumento da biodiversidade e da conectividade das redes ecológicas, com maior integração à natureza.



Seleção da Técnica

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

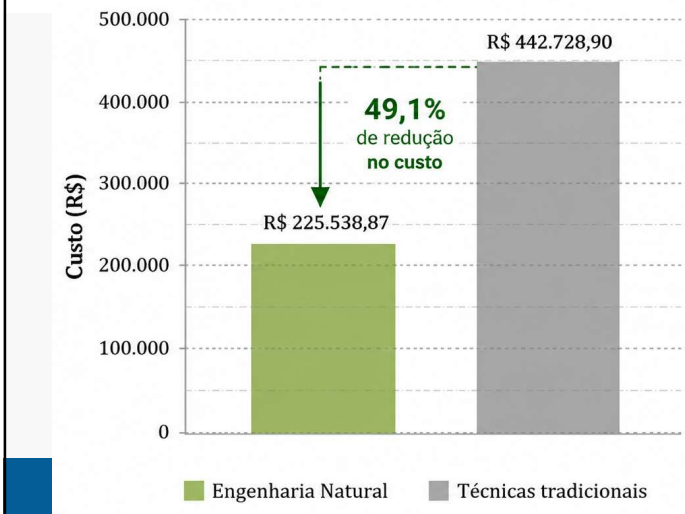


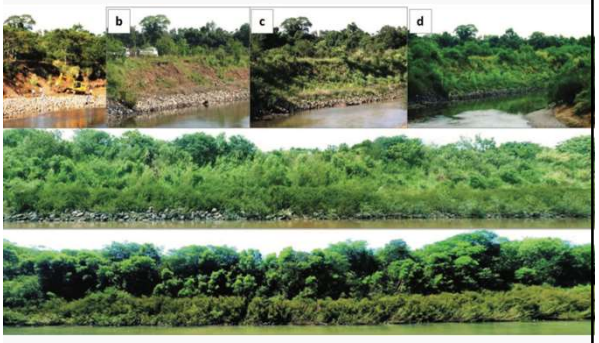


Seleção da Técnica

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Obra em Santa Cruz do Sul - RS





Implementação da Técnica

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Processos da Engenharia Natural	Etapas

1 Projeto executivo

2. Remoção da vegetação

3. Escavação de solo

4. Muro vivo

5. Grade viva

6. Seleção de plantas adequadas

Uma das maiores obras de Engenharia Natural realizada na Amazônia.



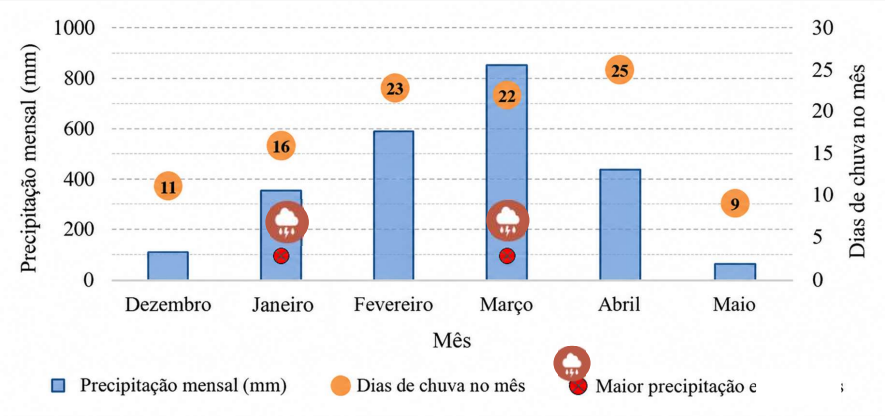
Necessidade do plantio de mudas, com intuito de arquear o solo, se integrando a paisagem (substituindo as estruturas de madeiras).

16

Implementação da Técnica

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Eficiência na estabilização de taludes



Precipitação relevante > 50,0 mm

Implementação da Técnica

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Engenharia Natural | Técnicos





Jan 2024
75,9 mm

Implementação da Técnica

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Engenharia Natural | Técnicos





Mar 2024
98,7 mm

Mai 2024
Pico das chuvas

19

Resultados

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Saúde
Revezamento de equipe minimizando a fadiga e lesões ocupacionais.

Financeiro
Custos evitados, sem necessidade de descomissionamento ao fechamento da mina.

Meio Ambiente
Estabilização da erosão com menor intervenção ambiental.

Solução baseada na natureza
Técnica com materiais que se integram à paisagem



Segurança do Trabalho
ZERO acidentes relacionado as atividades.

Social
Fortalecimento da relação de bons vizinhos

Resultados

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS

Trajetória da Obra – Trabalho em Equipe.

Hydro inova com técnica de engenharia natural que estabiliza encostas e promove integração com a paisagem

Iniciativa da Mineração Paragominas utiliza vegetação nativa para estabilizar encostas e tem sido apresentado como case em congressos internacionais



Abrangência

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTECNICAS



Lyon - França

160.000

Engajamentos Positivos



Porto Alegre - RS



Foz do Iguaçu- PR

10.000

Engajamentos Positivos

Conclusão

I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Engenharia Natural

As grandes melhorias nascem da **Coragem** de inovar, do **Cuidado** com as pessoas e meio ambiente, e da **Colaboração** incansável entre todos.





Obrigado!



CIGB ICOLD CBDB

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS

www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

A evolução da tecnologia de disposição final do resíduo de bauxita proveniente do processo Bayer: critérios técnicos e implicações de licenciamento ambiental

Paolla NORMANDO
Engenheira Química especialista em Meio Ambiente - Hydro

Amanda DAMASCENO
Engenheira Geotécnica - Hydro

RESUMO

No Brasil, ampliou-se o uso do empilhamento a seco (dry stacking) com filtro-prensa em rejeitos de mineração após o reforço regulatório de segurança de estruturas. Este trabalho descreve a transição da tecnologia de disposição de resíduos industriais empregada em uma unidade de refino de alumina na Região Norte, desde o início de sua operação na década de 90 até os dias atuais, partindo do desaguamento do resíduo por filtros rotativos e disposição em pasta segundo ciclos de secagem, até o desaguamento por filtros prensa e disposição com compactação mecânica. . Nesse trabalho, serão destacados os critérios técnicos e respectivas implicações no decorrer do licenciamento.
A solução técnica atualmente empregada envolve teor de sólidos de cerca de 78% (filtro-prensa), diques com função não-hidráulica, compactação em camadas e fechamento progressivo. A governança operacional inclui instrumentação geotécnica, auditorias, monitoramentos ambientais em conformidade com exigências de licenciamento, planos de atendimento a emergências e simulados práticos. No plano regulatório, discute-se o uso por analogia das versões iniciais das normas ABNT NBR 13.028/13.029 e a evolução a partir da publicação da versão 2025, especialmente a parte 3. O estudo contribui para sistematizar critérios técnicos empregados na gestão de resíduo de bauxita filtrado gerando evidências em contexto amazônico .

ABSTRACT

In Brazil, the use of dry stacking with filter-press dewatering for mining tailings has expanded following the strengthening of regulations governing the safety of containment structures. This paper describes the evolution of the industrial waste disposal technology employed at an alumina refinery in Northern Brazil, from the beginning of its operations in the 1990s to the present day. The study covers the transition from residue dewatering using rotary filters and paste disposal based on drying cycles to filter-press dewatering and mechanically compacted dry disposal. It also highlights the technical criteria adopted throughout this process and their implications during environmental licensing.

The technical solution currently in use involves a solids content of approximately 78% after filter-press dewatering, embankments with a non-hydraulic function, layer-by-layer compaction, and progressive closure. Operational governance includes geotechnical instrumentation, independent audits, environmental monitoring in compliance with licensing requirements, emergency response plans, and practical emergency drills. From a regulatory perspective, the paper discusses the analogical application of the initial versions of ABNT NBR 13.028/13.029 standards, and the developments introduced with the 2025 revision, particularly Part 3. The study contributes to the systematization of technical criteria applied to the management of filtered bauxite residue and provides evidence from an Amazonian operational context.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos industriais e de mineração associados a grandes estruturas geotécnicas passou, nas últimas décadas, por um processo significativo de evolução técnica e regulatória no Brasil. Em especial, eventos recentes envolvendo barragens de rejeitos impulsionaram o fortalecimento do arcabouço normativo, ampliando as exigências relacionadas à segurança estrutural, à gestão de riscos e à transparência operacional. Nesse contexto, tecnologias alternativas à disposição convencional de rejeitos em barragens hidráulicas ganharam relevância, destacando-se o empilhamento a seco (*dry stacking*).

No setor de refino de alumina, o resíduo de bauxita gerado pelo processo Bayer apresenta características físico-químicas e geotécnicas particulares, e sua disposição final evoluiu. Nas fases iniciais da indústria de alumina, o resíduo de bauxita era frequentemente armazenado em pilhas próximas às unidades de processamento, sendo também comum sua disposição em minas já exauridas [1]. Com a evolução das práticas de gestão, controle e monitoramento dessas áreas, foram implementadas melhorias voltadas à redução dos riscos de contaminação ambiental e ao aprimoramento das condições para recuperação futura dos locais de disposição. Em outras situações, o resíduo era destinado a vales barrados, estuários, corpos d'água continentais e ambientes marinhos, prática conhecida como *offshore* disposal [2]. A disposição de resíduos em corpos hídricos receptores ou diretamente no oceano, adotada em muitos casos devido à limitada disponibilidade de áreas terrestres para armazenamento, foi gradualmente descontinuada pela maior parte das refinarias de alumina, permanecendo apenas em alguns países, como Japão e Itália [1].

Com a utilização de filtros prensa no processo de disposição, tornou-se possível aumentar o teor de sólidos do resíduo para valores próximos de 75–80%, permitindo que o material passe a apresentar comportamento semelhante ao de um solo permitindo sua disposição em condição não saturada. Estudos técnicos demonstram que, nessas condições, o resíduo pode ser disposto em pilhas e compactado, reduzindo significativamente os riscos associados a estruturas hidráulicas [3].

A evolução do marco regulatório brasileiro também contribuiu decisivamente para a adoção de tecnologias alternativas de disposição de rejeitos. A instituição da Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010) estabeleceu requisitos mínimos para o gerenciamento da segurança dessas estruturas, posteriormente aprimorados após os eventos de Mariana e Brumadinho, que motivaram a promulgação da Lei nº 14.066/2020 e a revisão de diversos normativos da Agência Nacional de Mineração (ANM). As mudanças regulatórias reforçaram a busca por soluções que reduzissem a dependência de reservatórios hidráulicos e os riscos associados ao armazenamento de rejeitos em polpa, impulsionando a adoção de sistemas de filtragem e disposição por empilhamento a seco. Essas tecnologias passaram a representar não apenas uma alternativa operacional, mas também uma estratégia de mitigação de riscos alinhada às novas exigências de segurança e governança das estruturas geotécnicas.

Por isso, em função dos avanços tecnológicos associados à filtragem e à disposição seca de resíduos do processo Bayer, tem-se utilizado a norma técnica ABNT NBR

13028:2025 – parte 3 voltada ao projeto, operação e monitoramento de pilhas de resíduo de bauxita filtrado.

No âmbito brasileiro e amazônico, a disposição de resíduo de bauxita filtrado por empilhamento já vem sendo aplicada em larga escala desde a década de 90, tendo evoluído expressivamente com a aplicação da metodologia de filtragem por filtros prensa nesse resíduo desde 2017. Experiências nacionais demonstram que a transição tecnológica para o *dry stacking* representa uma mudança de método construtivo e uma evolução na filosofia de gestão de riscos e de governança das estruturas de disposição [4].

Assim, o trabalho tem como objetivo descrever e discutir sobre o processo de licenciamento de uma pilha de resíduo filtrado em um empreendimento de refino de alumina localizado na Região Norte do Brasil. São apresentados os critérios técnicos que basearam essa análise, bem como as implicações decorrentes no processo de licenciamento ambiental, à luz das normas técnicas aplicáveis e de boas práticas internacionais. A discussão busca contribuir para a sistematização de critérios técnicos e regulatórios aplicáveis à disposição final do resíduo de bauxita do processo Bayer, em consonância com experiências consolidadas no Brasil e no exterior [5].

2. CONTEXTO NORMATIVO E ENQUADRAMENTO TÉCNICO

2.1 Evolução regulatória da segurança de barragens no Brasil

A ocorrência de acidentes com barragens de rejeitos no Brasil resultou no fortalecimento das exigências regulatórias relacionadas à segurança dessas estruturas, especialmente em aspectos ligados ao projeto, monitoramento, operação e gestão de riscos.

Nesse contexto, métodos alternativos de disposição de rejeitos passaram a receber maior atenção do setor mineral, incluindo sistemas com rejeitos filtrados e disposição por empilhamento a seco. A adoção dessas tecnologias está associada à redução da dependência de reservatórios hidráulicos permanentes e à mudança no comportamento geotécnico da estrutura, mantendo, entretanto, a necessidade de controles adequados de drenagem, estabilidade, operação e monitoramento ao longo de sua vida útil.

2.2 Ausência de normatização específica para pilhas de resíduo de bauxita do processo Bayer filtrado

O Brasil avançou nos últimos anos em requisitos regulatórios relacionados à segurança de barragens e disposição de rejeitos, sobretudo com a evolução da norma técnica ABNT NBR 13028, além de requisitos definidos por órgãos ambientais e reguladores.

O resíduo de bauxita filtrado apresenta características específicas decorrente da natureza da bauxita, do processo Bayer e das condições associadas ao seu desaguamento e disposição. Com a aplicação de sistemas de desaguamento por filtro prensa, o material passa a apresentar elevados teores de sólidos, permitindo sua disposição em pilhas.

Nesse contexto, a avaliação dessas estruturas depende de análises específicas de comportamento hidráulico, geotécnico e operacional, de forma a garantir condições

adequadas de estabilidade, drenagem, controle ambiental e segurança ao longo da vida útil da estrutura[1].

Por isso, verifica-se notada relevância da análise técnica conduzida pelos órgãos ambientais e reguladores, que passam a avaliar, caso a caso, a suficiência das premissas de projeto, dos estudos geotécnicos, dos sistemas de monitoramento e das medidas de controle propostas. Esse cenário exige a apresentação de justificativas técnicas robustas e de evidências que demonstrem que a estrutura opera sob condições específicas, por vezes associadas à ausência de reservatório permanente, ao comportamento predominantemente não saturado do material disposto e ao comportamento predominantemente dilatante no cisalhamento.

Dessa forma, o processo de licenciamento ambiental passa a demandar uma integração mais estreita entre engenharia geotécnica, segurança operacional e gestão ambiental, de modo a fornecer subsídios técnicos suficientes para o enquadramento regulatório da estrutura e para a tomada de decisão pelos órgãos competentes.

Nesse contexto, os estudos de caracterização geotécnica, análises de estabilidade, balanço hídrico, modelagens de drenagem, programas de instrumentação, controles operacionais, ambientais e programas de monitoramento assumem papel central no processo de licenciamento.

2.3 Aplicação da ABNT NBR 13.028

No contexto brasileiro, a definição dos critérios técnicos aplicáveis às pilhas de resíduo de bauxita filtrado tem se baseado na utilização de normas existentes, em especial a ABNT NBR 13.028, relativa ao projeto de pilhas, complementada por referências regulatórias e ambientais utilizadas nos processos de licenciamento.

Nesse sentido, aspectos previstos na NBR 13.028 relacionados à estabilidade geotécnica, definição geométrica, controle construtivo, avaliação de fatores de segurança, drenagem superficial e monitoramento são diretamente aplicáveis ao contexto de pilhas de resíduo filtrado.

No caso específico das pilhas de resíduo de bauxita filtrado, a aplicação dos dispositivos normativos suporta a verificação da função exclusivamente geotécnica dos elementos estruturais , com elevado controle de poropressões internas e dilatância do resíduo compactado, e que a estabilidade da estrutura é regida por critérios associados à compactação, à geometria e ao controle de drenagem superficial.

Dessa forma, as análises técnicas passam a considerar seu comportamento físico-funcional baseado em normativas atuais, sustentado por evidências de desempenho, dados de monitoramento e práticas consolidadas de governança operacional. Essa aplicação técnica das normas existentes tem permitido compatibilizar o avanço tecnológico do empilhamento a seco com as exigências regulatórias vigentes, preservando os princípios de segurança, prevenção e controle ambiental no âmbito do licenciamento.

No caso da norma de empilhamento de rejeitos, e portanto, das pilhas de resíduo de bauxita filtrado, a aplicação exige demonstrar que os diques e demais elementos construtivos não exercem função hidráulica, que não há formação de reservatório de líquidos permanentes e que a estabilidade da estrutura decorre predominantemente

de critérios geotécnicos associados à compactação, geometria e controle de drenagem superficial.

Essa interpretação técnica tem sido fundamental para orientar decisões no âmbito do licenciamento ambiental, permitindo compatibilizar o avanço tecnológico do empilhamento a seco com as exigências regulatórias vigentes, sem comprometer os princípios de segurança e prevenção que norteiam a gestão de grandes estruturas geotécnicas no país.

3. CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA A TRANSIÇÃO DE ENQUADRAMENTO

3.1 Características do resíduo de bauxita filtrado (processo Bayer)

O resíduo de bauxita proveniente do processo Bayer possui características específicas, . Com os avanços nas tecnologias de desaguamento, especialmente com a aplicação de filtros prensa, o material passou a ser gerado com elevado teor de sólidos, permitindo sua disposição em condição não saturada e em estruturas do tipo pilha.

Do ponto de vista ambiental, a classificação atualizada da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 10004:2024 enquadra Resíduo de bauxita na forma de torta sólida ou semisseca que permite o empilhamento a seco, não-corrosivo como resíduo não perigoso. Ensaios geotécnicos e experiências operacionais indicam que, quando corretamente projetado, disposto e monitorado, o material pode apresentar comportamento compatível com sistemas de disposição em pilha, desde que sejam mantidos controles adequados de drenagem, umidade, compactação e estabilidade [3].

A caracterização geotécnica do resíduo de bauxita filtrado constitui etapa fundamental para a definição dos critérios de projeto e avaliação da estabilidade das estruturas de disposição. Parâmetros relacionados à resistência, compressibilidade, permeabilidade e compactação influenciam diretamente o desempenho geotécnico da pilha, subsidiando as análises de estabilidade, drenagem e controle operacional. A **Tabela *1***, apresenta faixas típicas de propriedades geotécnicas observadas para resíduos de bauxita desaguados por filtro-prensa, determinadas a partir de estudos experimentais e monitoramento de campo realizados em condições representativas de operação na Região Norte do Brasil.

.**Tabela 1- Faixas típicas de parâmetros geotécnicos para resíduo de bauxita filtrado**

Parâmetro	**Faixa típica observada**
Massa específica dos grãos, ρs (g/cm³)	2,99 a 3,06
Massa específica seca máxima, γd,max (kN/m³)	15,2 a 16,2
Umidade ótima de compactação (%)	26,5 a 27,3
Índice de vazios inicial, e_0	0,82 a 1,24
Limite de Liquidez, LL (%)	31 a 34
Índice de Plasticidade, IP (%)	9 a 17
Condutividade hidráulica, k (m/s)	$2{,}9 \times 10^{-8}$ a $3{,}0 \times 10^{-7}$

Parâmetro	Faixa típica observada
Índice de Compressão, Cc	0,12 a 0,65
Índice de Recompressão, Cr	0,03 a 0,11
Coeficiente de adensamento, Cv (cm²/s)	$3{,}8 \times 10^{-3}$ a $6{,}7 \times 10^{-2}$
Coesão efetiva, c' (kPa)	6 a 16
Ângulo de atrito efetivo, φ' (°)	31 a 37
Resistência não drenada, Su (kPa)	86 a 110
Parâmetro de geração de poropressão, ru	0,03 a 0,51

Fonte: Silva, P. H. A. d. *Simulação numérica das poropressões em aterros construídos com resíduo da produção de alumina desaguado por filtros prensa,* 2020.

3.2 Sistema de filtragem por filtro-prensa e teor de sólidos

Para o caso estudado, a adoção do sistema de filtragem do resíduo representa o principal fator associado à mudança na forma de disposição do material. O processo de desaguamento permite reduzir significativamente o volume de água presente no resíduo, resultando em um material com elevado teor de sólidos e menor fluidez quando comparado à disposição convencional via úmida.

Com isso, o resíduo passa a poder ser disposto em camadas sucessivas, com controle geométrico e operacional semelhante ao adotado em estruturas de empilhamento. Essa condição diferencia a disposição de resíduo filtrado das barragens convencionais de rejeitos, nas quais o material é normalmente disposto com elevado teor de umidade [3].

3.3 Geometria da pilha e função dos diques

Na disposição em pilha, as estruturas periféricas têm função associada ao confinamento do material e ao controle da drenagem superficial da área. A geometria da pilha é definida a partir das condições de estabilidade da estrutura, considerando aspectos como inclinação dos taludes, alteamento, drenagem e características do material disposto [4].

3.4 Disposição, compactação em camadas e estabilidade geotécnica

A disposição do resíduo filtrado é realizada em camadas sucessivas, com controle operacional das condições de lançamento e compactação do material. Esse método permite maior controle geométrico da pilha e acompanhamento das condições de estabilidade ao longo da operação.

A compactação e os sistemas de drenagem superficial contribuem para o controle da infiltração de águas pluviais e das condições de umidade do maciço. Em regiões de elevada pluviosidade, como a Região Norte do Brasil, esses controles operacionais têm papel importante no desempenho geotécnico da estrutura [4,5].

4. GOVERNANÇA OPERACIONAL E SEGURANÇA DA ESTRUTURA

A mudança da disposição convencional para sistemas de empilhamento de resíduo filtrado exige não apenas avaliações geotécnicas adequadas, mas também

acompanhamento operacional e monitoramento contínuo da estrutura. Mesmo sem a presença de reservatório permanente de rejeitos, aspectos relacionados à estabilidade, drenagem, alteamento e controle superficial continuam sendo fundamentais para o desempenho seguro da pilha ao longo de sua operação

A abordagem adotada nessa discussão também se alinha aos princípios estabelecidos pelo *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM), desenvolvido pelo International Council on Mining and Metals (ICMM), Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e Principles for Responsible Investment (PRI). O GISTM reforça a necessidade de integração entre projeto, operação, monitoramento, gestão de riscos e governança ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos e resíduos. Nesse contexto, práticas como monitoramento contínuo, gestão de águas, definição clara de responsabilidades técnicas, avaliação permanente de riscos e implementação de medidas preventivas constituem elementos fundamentais para garantir a segurança e o desempenho operacional de estruturas de disposição de resíduo filtrado em pilha [6].

4.1 Instrumentação e monitoramento geotécnico

O monitoramento geotécnico constitui um dos pilares da governança operacional da pilha de resíduo seco. A instrumentação é direcionada ao acompanhamento contínuo do comportamento da estrutura, permitindo verificar a aderência entre o desempenho observado em campo e as premissas adotadas em projeto.

O sistema de monitoramento pode incluir marcos e prismas topográficos para acompanhamento de deslocamentos horizontais e verticais do maciço, levantamentos topográficos periódicos para controle geométrico da pilha, piezômetros para verificação das condições de poropressão e confirmação da condição predominantemente não saturada do material disposto, além de inclinômetros instalados em seções consideradas críticas para avaliação de possíveis deformações internassem profundidade. Complementarmente, inspeções visuais de campo e monitoramento das condições de drenagem superficial auxiliam na identificação precoce de processos erosivos, instabilidades localizadas ou alterações nas condições operacionais da estrutura.

A integração dos dados obtidos pela instrumentação com as inspeções de rotina permite avaliar tendências de comportamento ao longo do tempo, subsidiando decisões operacionais e ações preventivas quando necessário. Esse acompanhamento contínuo reforça a rastreabilidade técnica da gestão da estrutura e contribui para demonstrar que sua estabilidade está associada predominantemente a mecanismos geotécnicos, compatíveis com o enquadramento como pilha de resíduo filtrado [4,5].

4.2 Auditorias técnicas e inspeções de segurança

A operação da pilha envolve inspeções periódicas e acompanhamento técnico das condições da estrutura, incluindo taludes, bermas, drenagem superficial e condições gerais de estabilidade. Essas atividades permitem verificar se o comportamento observado em campo permanece compatível com as premissas adotadas em projeto e operação.

Além do acompanhamento operacional, avaliações técnicas independentes podem ser utilizadas como suporte ao processo de licenciamento e à verificação das condições de segurança da estrutura. Em sistemas de disposição por empilhamento, essas avaliações auxiliam no acompanhamento do desempenho geotécnico e das condições operacionais ao longo da vida útil da pilha [3,4]

4.3 Gestão de águas e controle ambiental

A gestão de águas assume importância estratégica em estruturas de disposição de resíduo filtrado localizadas na Região Amazônica, devido aos elevados índices pluviométricos característicos da região. De acordo com as Normais Climatológicas do Brasil (1991-2020), grande parte da Amazônia apresenta precipitações anuais superiores a 2.000 mm, podendo atingir valores ainda mais elevados em determinadas localidades, o que impõe desafios adicionais ao controle operacional e à manutenção da estabilidade geotécnica das estruturas [7].

Nesse contexto, o dimensionamento dos sistemas de drenagem superficial deve considerar adequadamente as condições hidrológicas locais, de forma a garantir a condução segura dos escoamentos pluviais, minimizar processos erosivos e reduzir a infiltração de água no maciço. A gestão eficiente das águas constitui um dos principais fatores para o desempenho seguro de estruturas de disposição de rejeitos e resíduos, especialmente em regiões sujeitas a elevados volumes de precipitação e eventos pluviométricos intensos [8].

Dessa forma, o projeto e a operação de pilhas de resíduo de bauxita filtrado na Amazônia requerem a adoção de sistemas robustos de drenagem, proteção superficial dos taludes, monitoramento das condições de umidade e inspeções periódicas das estruturas hidráulicas associadas. Tais medidas contribuem para a preservação das condições de estabilidade da pilha ao longo de sua vida útil e para a mitigação de riscos ambientais decorrentes do escoamento superficial e da erosão [8].

Em razão dessas particularidades climáticas, os estudos hidrológicos e hidráulicos assumem papel central no processo de licenciamento ambiental, fornecendo subsídios técnicos para demonstrar a adequação dos sistemas de manejo de águas pluviais e a viabilidade da disposição de resíduo de bauxita por empilhamento a seco em condições amazônicas [7,8].

4.4 Planos de Atendimento a Emergências e simulados

A gestão da segurança da pilha pode incluir a elaboração e manutenção de Planos de Ação de Emergência (PAE), conforme previsto em normativos aplicáveis ao licenciamento ambiental, como a IN SEMAS nº 12/2019. Esses planos consideram possíveis situações de emergência relacionadas à operação da estrutura, incluindo ocorrências geotécnicas localizadas, falhas operacionais e eventos de chuva intensa.

Também podem ser realizados treinamentos e simulados periódicos, com o objetivo de orientar as equipes e definir procedimentos de resposta em caso de emergência. Essas ações complementam o acompanhamento operacional e o monitoramento da estrutura ao longo de sua operação [4,5].

5. IMPLICAÇÕES NO LICENCIAMENTO AMBIENTAL

5.1 Avaliação técnica no RCA e no Parecer Técnico

O Relatório de Controle Ambiental (RCA) apresentado no processo de licenciamento contempla a descrição do sistema de disposição por empilhamento a seco, incluindo o processo de filtragem do resíduo, as características gerais da pilha, os critérios geotécnicos adotados e os sistemas de drenagem e controle ambiental previstos para a estrutura.

A avaliação realizada pelo órgão ambiental considera as características operacionais e construtivas da estrutura, bem como os estudos e programas de monitoramento apresentados no processo de licenciamento. A partir dessa análise, o projeto é avaliado considerando as características associadas à disposição de resíduo filtrado em pilha, observadas as condições operacionais e de controle previstas no RCA.

5.2 Condicionantes ambientais e mitigação de riscos

Como resultado da análise técnica conduzida pelo órgão ambiental, são estabelecidas condicionantes voltadas ao acompanhamento contínuo do desempenho geotécnico e ambiental da estrutura ao longo de sua operação. Essas condicionantes refletem uma abordagem baseada em riscos, na qual os mecanismos de monitoramento, auditoria e verificação independente atuam como instrumentos de prevenção e mitigação de potenciais impactos ambientais e geotécnicos.

Entre as principais exigências estabelecidas destacam-se a apresentação anual dos relatórios de monitoramento geotécnico, incluindo análise conclusiva dos resultados obtidos, avaliação de conformidades e não conformidades e descrição das medidas corretivas implementadas quando aplicáveis. Tal condicionante possui papel relevante na mitigação de riscos associados à estabilidade da estrutura, permitindo o acompanhamento contínuo do seu comportamento e a identificação precoce de desvios em relação às premissas de projeto.

Complementarmente, exige-se a apresentação anual dos resultados da instrumentação geotécnica, incluindo seções indicativas da localização dos instrumentos, profundidades de instalação e interpretação gráfica das leituras de piezômetros, marcos superficiais e inclinômetros, quando aplicáveis. Essa exigência permite verificar o comportamento da estrutura ao longo do tempo, fornecendo subsídios para avaliação das condições de deformação, deslocamento e drenagem do maciço.

Outra condicionante relevante refere-se à avaliação anual de conformidade do Manual de Operação da pilha, conduzida por consultoria externa e independente. Essa medida atua na mitigação de riscos operacionais ao verificar a aderência das atividades executadas em campo aos procedimentos estabelecidos para disposição, compactação, drenagem e controle da pilha, contribuindo para a manutenção das condições consideradas nos estudos de engenharia.

No âmbito da gestão de emergências, são apresentados o Relatório de Conformidade e Operacionalidade (RCO) e da Declaração de Conformidade e Operacionalidade (DCO) do Plano de Ação de Emergência (PAE), elaborados por consultoria independente. Essa condicionante visa assegurar que os procedimentos de resposta a eventos adversos permaneçam atualizados, testados e compatíveis com as condições operacionais da estrutura.

Adicionalmente, análises de estabilidade acompanhadas da respectiva Declaração de Condição de Estabilidade (DCE) são apresentadas, além de relatórios *As Built*. Essa exigência estabelece um mecanismo de controle geotécnico progressivo, garantindo que o desempenho da estrutura seja reavaliado continuamente à medida que novas elevações são incorporadas ao sistema.

Por fim, são determinadas ações de mitigação dos impactos paisagísticos associados à expansão da estrutura e à sua integração ao ambiente local.

A análise de condicionantes impostas pelo órgão ambiental demonstra que a transição para o sistema de empilhamento a seco não resultou na redução das exigências de controle e acompanhamento da estrutura, mas sim na adoção de mecanismos compatíveis com seus riscos e características operacionais. Nesse contexto, as condicionantes assumem papel fundamental na manutenção da segurança geotécnica, na prevenção de impactos ambientais e na verificação contínua da aderência entre projeto, construção e operação. A Tabela 2, sintetiza as principais condicionantes ambientais estabelecidas para a estrutura e sua respectiva contribuição para a mitigação dos riscos identificados.

Tabela 2 - Relação entre condicionantes e mitigação de riscos

Condicionante	**Objetivo**
Relatório anual de monitoramento geotécnico	Verificar tendências de comportamento da pilha
Instrumentação geotécnica (piezômetros, marcos e inclinômetros)	Detectar precocemente anomalias
Auditoria independente do Manual de Operação	Avaliar aderência aos procedimentos de operação
RCO e DCO do PAE	Garantir efetividade do plano de emergência
DCE a cada etapa de subida da pilha	Confirmar estabilidade dos alteamentos
Relatórios As Built	Validar conformidade construtiva
Projeto de Atenuação do Impacto Visual	Reduzir interferências visuais e melhorar integração ambiental

5.3 Interfaces entre engenharia, segurança e exigências regulatórias

O processo de licenciamento destacou a necessidade de integração entre os estudos de engenharia, os programas de monitoramento e as medidas de controle ambiental e operacional previstas para a estrutura. A avaliação técnica considerou os critérios adotados para disposição do resíduo filtrado, bem como os procedimentos de acompanhamento e controle apresentados ao longo do processo.

A experiência demonstra a importância de que o licenciamento ambiental acompanhe a evolução das tecnologias aplicadas à disposição de resíduos do processo Bayer,

considerando as características específicas de cada sistema e os estudos técnicos associados à sua implantação e operação.

6. DISCUSSÃO

A discussão dos resultados obtidos neste estudo permite refletir sobre a aderência dessa solução às boas práticas nacionais e internacionais, bem como sobre a aplicação às normas técnicas existentes.

6.1 Comparação com boas práticas nacionais e internacionais

A adoção do empilhamento a seco de resíduo de bauxita com uso de sistemas de filtragem já vem sendo aplicada em diferentes operações de mineração e refino, como alternativa aos métodos convencionais de disposição de rejeitos. Estudos e experiências operacionais indicam que, quando associadas a critérios adequados de projeto, operação e monitoramento, as estruturas de disposição em pilha podem apresentar condições satisfatórias de estabilidade e controle ambiental [3,4,5].

No contexto brasileiro, a aplicação dessa tecnologia em refinarias de alumina demonstra a necessidade de adaptação às condições climáticas e operacionais locais, especialmente em regiões de elevada pluviosidade, como a Amazônia. Nesse cenário, aspectos relacionados à drenagem superficial, controle operacional, monitoramento geotécnico e manejo de águas têm papel importante no desempenho da estrutura ao longo de sua operação.

6.2 Aplicação da ABNT NBR 13028:2024

Os aspectos previstos na NBR 13.028 relacionados à estabilidade geotécnica, definição geométrica, controle construtivo, avaliação de fatores de segurança, drenagem superficial e monitoramento são diretamente aplicáveis ao contexto de pilhas de resíduo filtrado.

A aplicação dos dispositivos normativos suporta a verificação da função exclusivamente geotécnica dos elementos estruturais, com elevado controle de poropressões internas e dilatância do resíduo compactado. Dessa forma, as análises técnicas passam a considerar seu comportamento físico-funcional.

Essa interpretação técnica tem sido fundamental para orientar decisões no âmbito do licenciamento ambiental, permitindo compatibilizar o avanço tecnológico do empilhamento a seco com as exigências regulatórias vigentes, sem comprometer os princípios de segurança e prevenção que norteiam a gestão de grandes estruturas geotécnicas no país.

6.3 Aplicabilidade do modelo para outros empreendimentos de alumina

Os resultados observados neste estudo indicam que a disposição de resíduo de bauxita por empilhamento a seco representa uma alternativa tecnicamente viável para empreendimentos de refino de alumina, desde que sejam consideradas as características específicas do resíduo, as condições climáticas locais, a disponibilidade de áreas para disposição e os requisitos de monitoramento e controle associados à operação da estrutura. Entretanto, a replicabilidade desse modelo para outros empreendimentos não deve ser analisada de forma generalizada.

No contexto brasileiro, o número de refinarias de alumina em operação é limitado e a adoção de sistemas de filtragem com disposição em pilha ainda não é amplamente difundida. Além disso, existem diferenças significativas entre os empreendimentos quanto à capacidade produtiva, volume de geração de resíduos, condições climáticas, disponibilidade territorial e histórico de disposição, fatores que influenciam diretamente a viabilidade técnica e operacional da transição para sistemas de empilhamento a seco.

Sob a perspectiva regulatória, a replicabilidade do modelo está fortemente condicionada às exigências estabelecidas pelos órgãos ambientais no âmbito de cada processo de licenciamento. A definição das condicionantes, dos programas de monitoramento, das exigências de auditorias independentes, dos critérios para avaliação da estabilidade geotécnica e dos mecanismos de gestão de riscos pode variar em função das características do empreendimento, uso e ocupação do solo, comunidades no entorno, do porte da estrutura, da sensibilidade ambiental da área de implantação e do entendimento técnico do órgão licenciador.

Dessa forma, embora os princípios técnicos associados à filtragem do resíduo, à disposição em condição não saturada e ao monitoramento geotécnico possam servir de referência para outros empreendimentos do setor, sua aplicação requer avaliações específicas para cada caso. A adoção do modelo depende não apenas do desempenho geotécnico esperado da pilha, mas também da capacidade de atendimento às condicionantes ambientais e aos requisitos regulatórios definidos durante o processo de licenciamento.

7. CONCLUSÕES

A partir das análises técnicas, operacionais, regulatórias e ambientais apresentadas neste estudo, podem ser destacadas as seguintes conclusões:

1. A disposição de resíduo de bauxita por empilhamento a seco, associada à utilização de sistemas de filtragem por filtro-prensa e elevados teores de sólidos, apresenta viabilidade técnica para aplicação em empreendimentos de refino de alumina, permitindo a disposição do material em condição predominantemente não saturada e reduzindo a dependência de estruturas convencionais de disposição hidráulica.
2. A transição do modelo de disposição para empilhamento deve ser fundamentada em critérios técnico-científicos que demonstrem o comportamento físico-funcional da estrutura, incluindo caracterização geotécnica do material, condições de drenagem, geometria do empilhamento, monitoramento e desempenho operacional ao longo de sua vida útil.

3. O caso analisado evidencia que a governança operacional, a instrumentação geotécnica, as auditorias independentes, as análises periódicas de estabilidade e os planos de preparação para emergências constituem elementos essenciais para a gestão de riscos e para a manutenção das condições de segurança da pilha.
4. As condições climáticas da Amazônia, caracterizadas por elevados índices pluviométricos, impõem desafios específicos ao dimensionamento dos sistemas de drenagem, ao manejo de águas pluviais e ao monitoramento

operacional, tornando esses aspectos fatores críticos para o desempenho geotécnico e ambiental das estruturas de disposição em pilha.

5. As condicionantes estabelecidas pelo órgão licenciador desempenham papel fundamental na mitigação dos riscos geotécnicos, operacionais e ambientais, demonstrando que a adoção do empilhamento a seco não reduz a necessidade de controle da estrutura, mas demanda mecanismos de acompanhamento compatíveis com suas características e riscos específicos.
6. Embora os princípios técnicos associados ao empilhamento a seco possam servir de referência para outros empreendimentos do setor de alumina, sua replicabilidade depende de avaliações individualizadas que considerem fatores como escala de geração de resíduos, condições climáticas, características geotécnicas locais, disponibilidade de áreas para disposição e exigências regulatórias estabelecidas pelos órgãos ambientais competentes.
7. Sob a perspectiva regulatória, o estudo demonstra que o enquadramento de estruturas de disposição de resíduo de bauxita deve evoluir de uma abordagem baseada predominantemente na classificação histórica das estruturas para uma avaliação fundamentada em seu comportamento físico-funcional, em seus mecanismos de estabilidade e nos riscos efetivamente associados à sua operação.
8. Por fim, este trabalho contribui para o avanço da discussão técnica e regulatória sobre a disposição de resíduo de bauxita filtrado no Brasil, oferecendo subsídios para processos de licenciamento ambiental, apoio à tomada de decisão dos órgãos reguladores e sistematização de critérios aplicáveis à transição de barragens para sistemas de empilhamento a seco em empreendimentos de refino de alumina.

9. PALAVRAS-CHAVE

Empilhamento a seco; Resíduo de bauxita; Segurança de estruturas geotécnicas; Enquadramento regulatório; Licenciamento ambiental; Filtro-prensa; Governança operacional.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Silva, P. H. A. d. *Simulação numérica das poropressões em aterros construídos com resíduo da produção de alumina desaguado por filtros prensa,* 2020.

[2] EVANS, K.; NORDHEIM, E. & TSESMELIS, K. Bauxite residue management. Suarez CE

[3] Hawkey, A.; Cavalli, D.; Fritzke, I. *Dry Stacking Filtration of Bauxite Residue with Filter Presses*. Proceedings of ICSOBA.

[4] Castilho, B. et al. *State-of-the-Art Bauxite Tailings Disposal Facilities and Techniques*. Proceedings of ICSOBA, 2019.

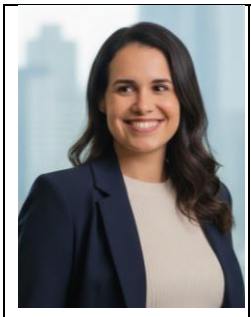
[5] Webb, R.; Gassner, L. *Sustainable Design for Construction and Operation of a Storage Area for Filter Press Bauxite Residue*. WSP / Australia.

[6] International Council on Mining and Metals (ICMM); United Nations Environment Programme (UNEP); Principles for Responsible Investment (PRI). *Global Industry Standard on Tailings Management*. London: ICMM, 2020.

[7] INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. *Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020.* Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2022.

[8] ICOLD (International Commission on Large Dams). *Tailings Dams and Waste Lagoons - Bulletin 121.* Paris: ICOLD.

(ed) Light Metals 2012, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, pp 63–66, 2012.

	**Paolla NORMANDO** Engenheira química e sanitarista, com mais de uma década de atuação na área ambiental. Experiência em licenciamento ambiental, gestão de requisitos legais, monitoramentos ambientais, recursos hídricos e riscos climáticos, com atuação em projetos industriais e mineração.
	**Amanda DAMASCENO** Engenheira Civil e Geotécnica com atuação em segurança e operação de estruturas de disposição de resíduos de bauxita. Experiência em trânsito de cheias, balanço hídrico, modelagem hidrológica, gestão de riscos, instrumentação geotécnica e controles climatológicos aplicados à mineração e refinaria de alumina. Atua na integração entre operação, projeto e segurança de barragens e pilhas

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

ANÁLISE DA ROBUSTEZ DA POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS À LUZ DA GOVERNANÇA DE UM EMPREENDIMENTO MULTIFUNCIONAL: O RAMAL DO AGRESTE – PISF

Bianca ANACLETO ARAÚJO DE SOUSA
Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Campina Grande

Luana ALVES DOS SANTOS
Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO

A Política Nacional de Segurança de Barragens, instituída pela Lei nº 12.334/2010 e atualizada pela Lei nº 14.066/2020, foi concebida com foco na barragem como unidade isolada de análise, classificação e fiscalização, considerando critérios como altura, volume, DPA e CRI. Seu desenho normativo prioriza o maciço e suas estruturas associadas, tratando cada barragem como empreendimento individual. Contudo, em sistemas multifuncionais e integrados, como o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), essa lógica setorial revela limitações. No Ramal do Agreste, composto por barragens, canais, túneis, aquedutos e estação de bombeamento operando de forma interdependente, a PNSB incide apenas sobre as barragens formalmente enquadradas na política. Essa delimitação pode gerar consequências relevantes, sobretudo uma governança fragmentada, marcada por responsabilidades operacionais distintas. A pesquisa adota abordagem qualitativa, analítica e exploratória, tendo como principal ferramenta de análise o arcabouço de robustez aplicado a sistemas socioecológicos. A robustez é compreendida como a capacidade de uma política pública manter suas funções essenciais mesmo diante de mudanças institucionais, ambientais e sociais. O arcabouço foi utilizado para examinar as interações entre quatro componentes centrais: Usuários de Recursos (UR), Infraestrutura (natural e construída), Infraestrutura Pública (normas e instrumentos) e Provedores de Infraestrutura Pública (arranjos institucionais). A análise considerou o período de 2010 a 2025, com revisão normativa e documental da PNSB e dos atos da ANA e da APAC, além de literatura sobre governança de riscos. Os resultados indicam que a PNSB demonstra consistência técnica e normativa na gestão de barragens individualizadas, mas apresenta limitações quando confrontada com a complexidade de um empreendimento integrado, a política tende a fragmentar a governança, distribuindo responsabilidades entre múltiplos atores.

ABSTRACT

The National Dam Safety Policy (PNSB), established by Law No. 12,334/2010 and updated by Law No. 14,066/2020, was designed with a focus on dams as isolated units of analysis, classification, and inspection, considering criteria such as height, storage volume, Associated Potential Damage (APD), and Risk Category (RC). Its regulatory framework prioritizes the dam structure and its associated components, treating each dam as an individual enterprise. However, in multifunctional and integrated systems, such as the São Francisco River Integration Project (PISF), this sectoral logic reveals important limitations. In the Agreste Branch, composed of dams, canals, tunnels, aqueducts, and pumping stations operating in an interdependent manner, the PNSB applies only to the dams formally classified under the policy. This delimitation may lead to significant consequences, especially fragmented governance characterized by distinct operational responsibilities. The research adopts a qualitative, analytical, and exploratory approach, using the robustness framework applied to socioecological systems as its main analytical tool. Robustness is understood as the capacity of a public policy to maintain its essential functions even under institutional, environmental, and social changes. The framework was used to examine the interactions among four central components: Resource Users (RU), Infrastructure (natural and built), Public Infrastructure (rules and policy instruments), and Public Infrastructure Providers (institutional arrangements). The analysis covered the period from 2010 to 2025, including a normative and documentary review of the PNSB and regulations issued by ANA and APAC, as well as literature on risk governance. The results indicate that the PNSB demonstrates technical and regulatory consistency in the management of individual dams, but presents limitations when confronted with the complexity of an integrated enterprise, as the policy tends to fragment governance by distributing responsibilities among multiple actors.

1. INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010, estabelece diretrizes para assegurar a integridade física e a proteção de comunidades e ecossistemas a jusante das barragens. A legislação aplica-se a barragens destinadas ao armazenamento de água, disposição de rejeitos ou resíduos industriais, desde que atendam a pelo menos um dos seguintes critérios: (i) altura do maciço igual ou superior a 15 metros; (ii) volume total do reservatório igual ou superior a 3 milhões de metros cúbicos; (iii) existência de resíduos perigosos no reservatório; (iv) classificação de Dano Potencial Associado (DPA) como médio ou alto, levando em consideração possíveis impactos econômicos, sociais, ambientais ou risco à vida humana; ou (v) Categoria de Risco (CRI) classificada como alta pela autoridade fiscalizadora competente (BRASIL, 2010). Esses critérios foram detalhados e atualizados pela Resolução CNRH nº 241, de 10 de setembro de 2024, que estabelece parâmetros técnicos, metodologias e critérios unificados para a classificação do DPA, da CRI, além de orientar os procedimentos de fiscalização e gestão da segurança, conforme previsto no art. 7º da referida lei (BRASIL, CNRH, 2024).

Antes da promulgação da PNSB, o Brasil carecia de um marco regulatório específico, com ações concentradas no Sistema Nacional de Defesa Civil (SINDEC), de caráter mais reativo que preventivo. A instituição da PNSB representou um avanço ao estabelecer um sistema de prevenção e monitoramento, complementado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), que centraliza dados para fiscalização e tomada de decisão.

Em 2020, a Lei nº 14.066 ampliou o escopo da PNSB, reforçando exigências como a contratação de profissionais habilitados e a elaboração detalhada de Planos de Segurança de Barragens (PSB). Tais atualizações buscam aumentar a eficácia na prevenção de riscos (BRASIL, 2020), embora estudos como os de Silva e Oliveira (2024) apontem a necessidade de análises mais abrangentes sobre a interface entre segurança estrutural e impactos socioambientais. No Brasil, as barragens atendem a múltiplos setores, desde geração de energia até abastecimento humano e irrigação, com diversificação de tipos, como as de rejeitos e controle de cheias (ALVES JUNIOR et al., 2020). Apesar da PNSB unificar normas, a fiscalização permanece descentralizada, sendo conduzida por órgãos como a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Agência Nacional de Mineração (ANM) e entes estaduais.

A PNSB, assim como outras políticas públicas, está sujeita a pressões decorrentes de mudanças sociais, políticas, econômicas e ambientais, que impõem desafios contínuos à governança da segurança de barragens. Eventos críticos, como os rompimentos das barragens de Fundão (Mariana, 2015) e Córrego do Feijão (Brumadinho, 2019), evidenciaram limitações relevantes nos mecanismos então vigentes de fiscalização, comunicação de risco e articulação institucional (ZHOURI et al., 2016; FREITAS et al., 2019). Esses episódios impulsionaram marcos institucionais e revisões normativas e o fortalecimento do arcabouço legal da segurança de barragens no país. Nesse sentido, a promulgação da Lei nº 14.066/2020 representou um avanço ao ampliar as exigências técnicas, reforçar a responsabilização dos empreendedores e aprimorar instrumentos de gestão e prevenção de riscos, refletindo um processo de aprendizado institucional.

Apesar desses avanços, a efetividade da PNSB ainda enfrenta limitações que demandam aprimoramentos contínuos. Persistem desafios relacionados à capacidade operacional dos órgãos fiscalizadores, à heterogeneidade dos critérios de fiscalização entre entes federativos, à integração de informações no SNISB e à efetiva implementação dos Planos de Segurança de Barragens e Planos de Ação de Emergência, especialmente em contextos de restrição orçamentária e técnica (MOREIRA, 2025 & ANA, 2025). Ademais, o aumento da complexidade dos empreendimentos, associado à intensificação de eventos hidrológicos extremos, reforça a necessidade de incorporar abordagens mais adaptativas, preventivas e integradas à política, de modo a fortalecer sua robustez frente a cenários de incerteza e mudança contínua.

Embora a Política Nacional de Segurança de Barragens represente um importante avanço regulatório, sua estrutura normativa foi concebida prioritariamente para a avaliação individualizada de barragens, considerando cada empreendimento de forma isolada. Em sistemas hídricos multifuncionais e interdependentes, como o Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), essa abordagem pode gerar limitações relevantes, uma vez que a segurança operacional depende não apenas da integridade física de cada barragem, mas também da articulação entre canais, túneis, aquedutos, estações de bombeamento, reservatórios e múltiplos atores institucionais responsáveis pela sua operação. Nesse contexto, a fragmentação da governança pode levar à subestimação do Dano Potencial Associado (DPA), à dispersão de responsabilidades operacionais e ao enfraquecimento da capacidade adaptativa do sistema como um todo.

A governança dessas estruturas torna-se cada vez mais complexa, demandando articulações institucionais bem definidas, procedimentos claros e canais eficazes de comunicação intersetorial. Nesse contexto de crescente complexidade institucional e ambiental, grandes empreendimentos hídricos multifuncionais assumem papel central na avaliação da robustez das políticas públicas de segurança de barragens.

O Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) insere-se nesse cenário como uma das principais infraestruturas de segurança hídrica do país, concebida para promover o abastecimento de água em regiões historicamente marcadas pela escassez, como o Semiárido nordestino. O projeto envolve um conjunto de barragens, reservatórios, canais e estações de bombeamento, operando de forma integrada e submetido às diretrizes da Política Nacional de Segurança de Barragens. O Ramal do Agreste (Eixo Leste do PISF) destaca-se pela sua relevância socioeconômica principalmente para a região de Pernambuco, esse empreendimento de infraestrutura hídrica capta água na barragem Barro Branco, em Sertânia (PE), sendo conduzida por canais, túneis e sifões aquedutos, com deságue no reservatório Ipojuca, em Arcoverde (PE) (BRASIL, 2019). A operação segura dessas estruturas depende não apenas da integridade física das barragens e reservatórios associados, mas também da coordenação entre diferentes órgãos federais e estaduais, da efetiva implementação dos instrumentos previstos na PNSB e da sua capacidade adaptativa.

Atualmente, a análise de risco em barragens ultrapassa a abordagem tradicional centrada exclusivamente no comportamento físico e geotécnico do maciço, incorporando uma visão mais ampla e sistêmica da segurança dessas estruturas. Nesse contexto, o risco passa a ser compreendido como resultado da interação entre

aspectos técnicos e institucionais, envolvendo, além das condições estruturais, falhas regulatórias, deficiências nos processos de fiscalização e limitações nos mecanismos de comunicação de risco (RODRIGUES, 2024). Essa perspectiva ampliada reconhece que eventos críticos frequentemente decorrem não apenas de insuficiências de projeto ou construção, mas também de lacunas na governança, na coordenação entre atores e na implementação efetiva dos instrumentos de gestão.

A robustez implica na capacidade de uma política pública seguir sendo efetiva diante de mudanças no cenário social, tendendo a apontar para a habilidade de manter funções sistêmicas básicas diante de transformações contínuas, apoiadas por infraestrutura institucional relevante. Assim, robustez é um exemplo de conservadorismo dinâmico, pelo qual um sistema avança ao mudar, mantendo suas funções-chave de maneira nova e eficaz (LUI et. al., 2025).

Diante desse panorama, o presente trabalho avaliou a governança da Política Nacional de Segurança de Barragens à luz do arcabouço de robustez, tendo como estudo de caso o Ramal do Agreste do Projeto de Integração do Rio São Francisco, buscando identificar em que medida a PNSB é capaz de manter sua efetividade frente a mudanças institucionais, ambientais e sociais. A análise contribui para a identificação de fragilidades e potencialidades no âmbito da segurança de barragens, oferecendo subsídios para o aprimoramento das estratégias de gestão, coordenação institucional e adaptação da política pública no contexto brasileiro.

2. METODOLOGIA

O presente estudo adotou uma abordagem qualitativa, de caráter analítico e exploratório (PRODANOV, 2013), com base na aplicação do arcabouço de robustez para avaliar a governança da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) buscando qualificar as interações entre infraestrutura e as dimensões ecológica, social, institucional. A escolha dessa abordagem justifica-se pela natureza sistêmica do objeto de estudo, que envolve múltiplos atores, escalas e dimensões técnicas, ambientais e sociais. A análise da PNSB como sistema socioecológico e de sua governança foi considerada para a escala temporal de 2010 até 2025. Esse período é marcado pela homologação da PNSB e suas implicações até a atualidade.

Inicialmente, foi realizada uma revisão documental e normativa, abrangendo a legislação federal relacionada à segurança de barragens, com destaque para a Lei nº 12.334/2010, a Lei nº 14.066/2020, a Resolução n° 236, de 30 de janeiro de 2017, alterada pela resolução de nº 121 de 09 de maio de 2022, da ANA, assim como, a Resolução n° 03/2017-DC alterada pela Resolução n° 03/2022-DC da APAC. Além de documentos técnicos, relatórios institucionais e publicações oficiais dos órgãos fiscalizadores responsáveis pela implementação da PNSB. Essa etapa teve como objetivo compreender a evolução do marco regulatório, os instrumentos de gestão previstos e as responsabilidades atribuídas aos diferentes atores institucionais.

Em seguida, procedeu-se a uma revisão bibliográfica sistematizada da literatura nacional e internacional sobre segurança de barragens, governança de riscos, sistemas socioecológicos e robustez institucional. Foram analisados estudos que abordam falhas em barragens, gestão de riscos complexos, aprendizagem

institucional e políticas públicas em contextos de incerteza, com ênfase em trabalhos que discutem os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019) como marcos críticos para o aprimoramento da governança da segurança de barragens no Brasil.

A PNSB foi então analisada como um sistema socioecológico, no qual interagem infraestruturas físicas (barragens, canais, aquedutos e túneis), recursos naturais (água e sedimentos) e múltiplos atores sociais (usuários) e institucionais (órgãos estaduais e agências reguladoras), operando sob condições de risco, incerteza e perturbações, tais como eventos hidrológicos extremos, falhas técnicas e limitações institucionais. A partir dessa perspectiva, aplicou-se o arcabouço da robustez para avaliar a capacidade da política de manter suas funções essenciais de segurança, mesmo diante de mudanças ambientais, sociais e institucionais. A descrição desses componentes foi realizada ao se responder às perguntas do Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos componentes do arcabouço de robustez

Componente	Questionamentos
Usuários de recursos (UR)	Qual(is) o(s) uso(s) da Barragem?
Infraestrutura Natural (IN)	Quais os afluentes e efluentes? Quais suas principais características?
Infraestrutura Pública (IP)	Quais os principais dispositivos legais e normativos que orientam a segurança das barragens?
Provedores de Infraestrutura Pública (PIP)	Que entidades formam o conjunto institucional que promove a governança das barragens do Ramal do Agreste?

A segunda fase do trabalho consistiu em uma análise de robustez, conduzida com base em critérios analíticos qualitativos, incluindo: (i) clareza e coerência do arranjo institucional; (ii) capacidade de coordenação entre os órgãos fiscalizadores; (iii) existência e efetividade dos instrumentos de prevenção e gestão de riscos, como os Planos de Segurança de Barragens e os Planos de Ação de Emergência; (iv) mecanismos de monitoramento, fiscalização e aprendizagem institucional; e (v) capacidade adaptativa da política frente a eventos extremos e a cenários de incerteza. Esses critérios foram utilizados para identificar fragilidades, potencialidades e lacunas na governança da segurança de barragens no âmbito da PNSB. Por fim, os resultados da análise serão discutidos à luz do conceito de robustez como conservadorismo dinâmico, avaliando em que medida a PNSB tem sido capaz de se adaptar e evoluir sem perder suas funções centrais de proteção da vida humana, do meio ambiente e do patrimônio.

3. RESULTADOS

O Ramal do Agreste possui aproximadamente 70,8 km de extensão, mas apenas uma pequena fração disso é composta pelas Barragens de Góis e Ipojuca. A grande maioria do sistema é formada por:

- 13 segmentos de canais, 06 túneis e 05 aquedutos-sifões.
- 01 estação de bombeamento, 01 linha de transmissão e 01 adutora.

A influência dessas estruturas é vital, pois são elas que realizam a função central do sistema, a condução da água para o abastecimento. Se um canal falha ou um túnel sofre um colapso, a "robustez" do fornecimento de água é quebrada, mesmo que as barragens permaneçam intactas e seguras perante a PNSB. O risco atual nessa situação deve ser compreendido de forma ampliada e sistêmica. Isso significa que a falha em uma estrutura de transporte (como um aqueduto) pode gerar impactos socioeconômicos tão graves quanto um problema na barragem, mas essa infraestrutura "hard" depende mais de normas operacionais da ANA/APAC e do MIDR do que das exigências da Lei nº 12.334/2010.

3.2 Componentes do Arcabouço de Robustez de Sistemas Socioecológicos

A Infraestrutura Natural (IN) refere-se ao volume de água armazenada no sistema Ramal do Agreste (RA) contudo, neste estudo, o conceito foi adaptado para englobar também a infraestrutura artificial, correspondente à barragem (barramento e estruturas associadas). Assim, no contexto desta pesquisa, adota-se apenas o termo Infraestrutura (In). Para o sistema RA tem-se duas Barragens respectivamente, os reservatórios Góis com capacidade de armazenamento de 12,77 milhões de m³ e o reservatório Ipojuca com 1,45 milhões de m³.

Os Usuários de Recurso (UR) do sistema RA, são todos aqueles que estão submetidos à uma vazão máxima outorgável definida pelo órgão regulamentador, nesse caso a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). A outorga é o instrumento de gestão da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) que autoriza a utilização dos recursos hídricos (Lei no 9.433, 1997). Para o sistema RA a APAC concede três tipos de uso, sendo abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação. A Tabela 2 mostra uma síntese dos UR do sistema RA.

Tabela 2 – Resumo dos Usuários de Recursos.

Destino	Uso
Adutora - COMPESA	Abastecimento Humano
TUD	Abastecimento Humano
Pequenos Usuários (PU)	Abastecimento Humano, dessedentação

	animal, irrigação

Os Provedores de Infraestrutura Pública (PIP), no contexto do sistema hídrico analisado, são principalmente, ANA e APAC como órgãos gestores, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó, criado pela Resolução nº 02, de 12 de setembro de 2000 e o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca criado pela Resolução nº 02, de 24 de Setembro de 2002, havendo ainda o Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR) empreendedor responsável pelas infraestruturas.

A Infraestrutura Pública (IP) hard do sistema Ramal do Agreste (RA) constitui-se de um conjunto de estruturas distribuídos da seguinte forma: 13 segmentos de canais, 06 túneis, 05 aquedutos-sifões, 02 reservatórios, 01 linha de transmissão para suprimento elétrico da estação de bombeamento, 01 estação de bombeamento e 01 adutora. Possui aproximadamente 70,8 km de extensão, sendo dimensionado para adução e recalque de 8 m³/s de água (Figura 1).



Figura 1 – Esquema de representação das infraestruturas físicas constituintes do sistema Ramal do Agreste.

A Barragem Góis (Negros) é constituída por enrocamento com núcleo argiloso. Localizada no município de Sertânia-PE, o seu reservatório represa o Riacho dos Góis, com um volume de acumulação no Nível d'Água Operacional – Normal (NMN) de 12,77 milhões de m³, em uma área superficial de 1,87 km². Possui vertedouro constituído por soleira livre e um canal lateral localizado na margem esquerda do reservatório. O barramento possui 31,60 m de altura, contados da crista até o solo

residual na base da barragem, com coroamento de 6 m de largura e 590 m de comprimento.

A Barragem Ipojuca é do tipo Gravidade em Concreto Compactado à Rolo (CCR) e Concreto Convencional (CCV). Localizada no município de Arcoverde-PE, o seu reservatório represa o Rio Ipojuca, com um volume de acumulação no Nível d'Água Operacional – Normal (NMN) de 1,45 milhões de m³, em uma área superficial de 0,526 km². O barramento é composto por 19 blocos construtivos, distribuídos em aproximadamente 372 m, com altura máxima de 18,00m, contados a partir da fundação. Na seção principal a estrutura é composta por uma soleira vertente. O vertedouro incorporado à barragem foi projetado para uma descarga de vazão de pico igual a 125m³/s.

A IP soft engloba as regras, regulamentos, instrumentos normativos e o conjunto institucional responsável pela operação, fiscalização e gestão da segurança das estruturas. Nesse contexto, destacam-se como principais instrumentos de governança a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010 e atualizada pela Lei nº 14.066/2020, além das resoluções normativas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), que estabelecem critérios para classificação de risco, Dano Potencial Associado (DPA), inspeções regulares, elaboração do Plano de Segurança da Barragem (PSB) e do Plano de Ação de Emergência (PAE).

A Figura 2 apresenta a aplicação do arcabouço de robustez ao sistema do Ramal do Agreste (PISF), permitindo visualizar as interações entre infraestrutura física, recursos hídricos, usuários e instituições responsáveis pela governança da segurança hídrica.

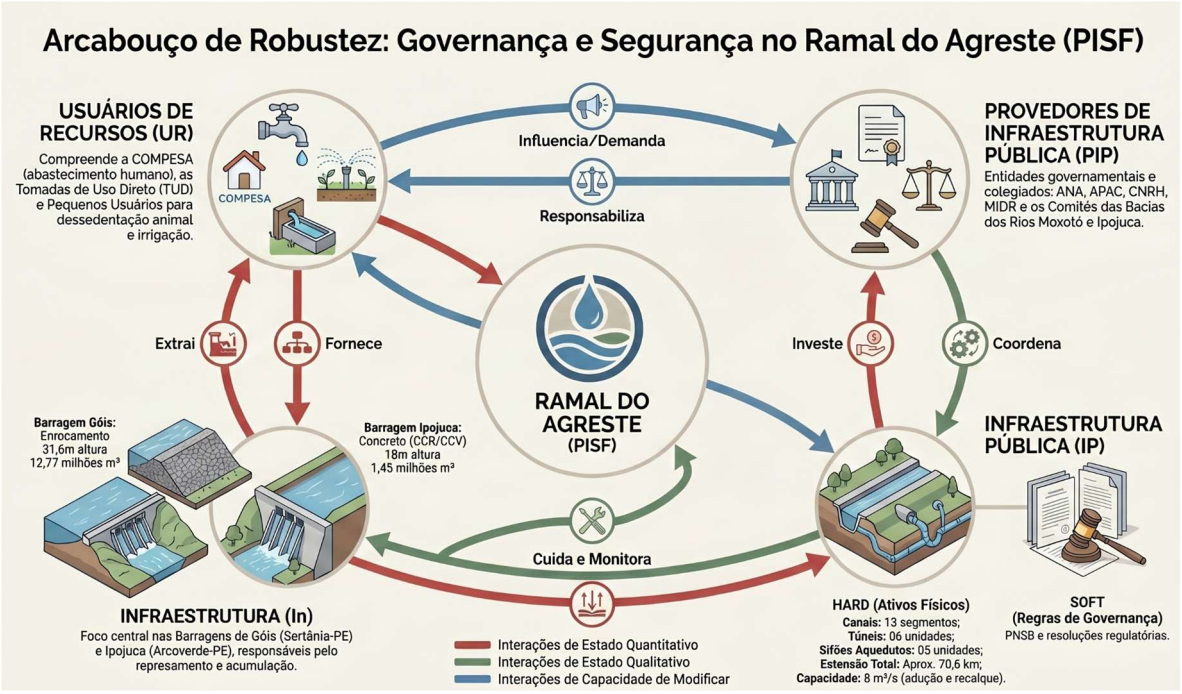


Figura 2 – Aplicação do arcabouço de robustez ao sistema socioecológico do Ramal do Agreste (PISF)

No âmbito do Estado Quantitativo, observa-se que os fluxos de água constituem o principal elemento de conexão entre os componentes do sistema. Os Usuários de Recursos (UR) exercem pressão sobre a Infraestrutura (In) por meio da demanda hídrica para abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação, enquanto os reservatórios e estruturas hidráulicas respondem garantindo o fornecimento e a regularização das vazões. Ao mesmo tempo, a infraestrutura física também sofre influência das cargas hidráulicas e dos níveis operacionais impostos pelo armazenamento de água, o que reforça a necessidade de monitoramento contínuo das condições estruturais das barragens e demais estruturas associadas. A figura demonstra ainda que informações quantitativas, como níveis d'água, vazões, dados de instrumentação e indicadores operacionais, são continuamente transmitidas aos Provedores de Infraestrutura Pública (PIP), subsidiando processos de fiscalização, tomada de decisão e gestão do risco.

No Estado Qualitativo, o arcabouço evidencia a importância da manutenção da integridade física e operacional da infraestrutura. Nesse contexto, a Infraestrutura Pública (IP soft), representada pelas normas, regulamentos e instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), atua como elemento estruturador da segurança do sistema, estabelecendo procedimentos de inspeção, monitoramento, manutenção e resposta a emergências. A atuação dos órgãos gestores e fiscalizadores, como ANA, APAC e MIDR, é fundamental para assegurar que as estruturas operem dentro de condições adequadas de segurança, reduzindo vulnerabilidades associadas a falhas operacionais, deficiências de manutenção ou eventos extremos.

A dimensão da Capacidade de Modificar demonstra como os processos de governança influenciam diretamente a robustez do sistema. As regras de operação e uso da água, especialmente por meio da outorga e da regulação, condicionam a atuação dos usuários e buscam compatibilizar segurança hídrica e disponibilidade do recurso. Simultaneamente, os PIP exercem papel central na coordenação institucional, responsabilização dos agentes envolvidos e implementação das diretrizes da PNSB. A análise integrada apresentada na Figura 2 reforça que a robustez do sistema depende da capacidade de adaptação e coordenação entre seus componentes. Assim, a segurança do Ramal do Agreste deve ser compreendida sob uma perspectiva sistêmica, na qual falhas institucionais, operacionais ou de comunicação podem comprometer a funcionalidade do empreendimento mesmo na ausência de problemas estruturais nas barragens. Dessa forma, a aplicação do arcabouço de robustez permite identificar que a efetividade da PNSB, em empreendimentos multifuncionais e interdependentes como o PISF, está associada não apenas ao cumprimento de requisitos técnicos, mas também à integração entre infraestrutura física, governança institucional e capacidade adaptativa frente a cenários de mudança e incerteza.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2017) – "Resolução nº 236, de 9 de dezembro de 2017: estabelece critérios para classificação do Dano Potencial Associado (DPA) de barragens de usos múltiplos de recursos hídricos", Diário Oficial

da União, Brasília, DF.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2025) – “Dia da PNSB 2025: 15 anos da Política Nacional de Segurança de Barragens – compartilhando experiências exitosas”, Brasília, Brasil.

ALVES JUNIOR, A. P. et al. (2020) – “O mapeamento da área de risco à jusante do Lago Igapó em Londrina – PR - Brasil, no caso de rompimento hipotético da barragem”, Territorium, v. II, n. 27, Portugal.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional (2024) – “Ramal do Agreste – Projeto de Integração do Rio São Francisco”, Brasil.

BRASIL (2010) – “Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010: estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens”, Diário Oficial da União, Brasília, DF.

BRASIL (2020) – “Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020: altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010”, Diário Oficial da União, Brasília, DF.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH (2024) – “Resolução nº 241, de 10 de setembro de 2024: estabelece parâmetros técnicos, metodologias e critérios unificados para classificação do DPA e da CRI”, Diário Oficial da União, Brasília, DF.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional (2019) – “Ramal do Agreste”, Brasil.

CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS – CRH (2002) – “Resolução CRH nº 02, de 24 de setembro de 2002: homologação da criação do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca – COBH/Ipojuca”, Recife, PE, Brasil.

CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS – CRH (2000) – “Resolução CRH nº 02, de 12 de setembro de 2000: homologação da criação do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó – COBH-Moxotó”, Recife, PE, Brasil.

FREITAS, C. M. de; SILVA, M. A. da; MENEZES, F. C.; SILVA, D. C. da; MAZOTO, M. L.; SILVA, R. P. de B. (2019) – “Desastre da barragem de rejeitos da Vale em Brumadinho, Minas Gerais, Brasil: análise crítica e desafios para a saúde coletiva”, Ciência & Saúde Coletiva, v. 24, n. 7, Rio de Janeiro, Brasil.

LUI, L.; AGUIAR, R. B. de; ROSA, T. G.; FERREIRA, G. C.; OLIVEIRA, A. (2025) – “Proteção e Uso de Dados: análise da robustez das estratégias das capitais brasileiras”, urbe – Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 17, Brasil.

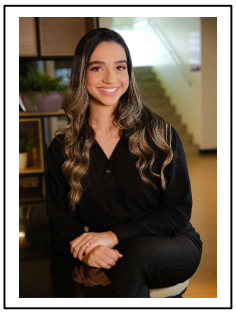
MOREIRA, H. S.; COSTA, P. G.; SÁ, R. A.; LUZ, W. V. (2025) – “Proposta de critérios para priorizar a fiscalização de barragens de usos múltiplos à luz da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)”, Research, Society and Development, v. 14, n. 1, São Paulo, Brasil.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. (2013) – “Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico”, 2. ed., Editora Feevale, Novo Hamburgo, Brasil.

RODRIGUES, T. (2024) – “Os limites da regulação política e a recorrência dos problemas com barragens em Minas Gerais”, Anais do Congresso Brasileiro de Geógrafas e Geógrafos, São Paulo, Brasil.

SILVA, E. D.; OLIVEIRA, F. R. (2024) – “A implementação dos planos de ação de emergência em barragens e os aspectos socioambientais”, Revista PPC – Políticas Públicas e Cidades, v. 13, n. 2, Curitiba, Brasil.

ZHOURI, A.; VALENCIO, N.; OLIVEIRA, R.; ZUCARELLI, M.; LASCHEFSKI, K. (2016) – “O desastre do rio Doce: entre as políticas de reparação e a gestão do risco”, Revista Brasileira de Ciências Sociais, v. 31, n. 91, São Paulo, Brasil.

 FOTO 3x4	**Bianca ANACLETO ARAUJO DE SOUSA** Professora da Universidade Federal do Oeste do Pará. Doutoranda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Campina Grande, Mestra em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Especialista em Engenharia Geotécnica e Engenheira Civil. Atualmente, desenvolve estudos focados em aplicações de machine learning em modelagem hidrológica, atuando também com inspeções e documentos técnicos relacionados à segurança de barragens.
 FOTO 3x4	**Luana ALVES DOS SANTOS** Bacharela em Engenharia Civil, mestre e doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental pela UFCG. Foi monitora das disciplinas de Laboratório de Química da Água e Fenômenos dos Transportes Experimental, pesquisadora de iniciação científica e estagiária do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) de 50 municípios do Estado da Paraíba (TED 003/2019 FUNASA/UFCG). Faz parte do Observatório de Governança das Águas (OGA).

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

ANÁLISE DOS EFEITOS DE PASS THROUGH ATRAVÉS DE CAMPANHAS TOPOBATIMÉTRICAS NO RESERVATÓRIO DA UHE AIMORÉS-MG

Sarah Crivellaro Maciel FALEIROS
Engenheira Geóloga e Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - Engenharia CF

Priscila Maria KIPPER
Engenheira Hídrica e MSc. em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - Engenharia CF

Gabriel Fonseca FALEIROS
Engenheiro de Controle e Automação - Engenharia CF

Cléber José de CARVALHO
Engenheiro Civil - ALIANÇA Geração de Energia S.A.

Ana Paula Borges MARCELINO
DSc. Engenheira Civil – ALIANÇA Geração de Energia S.A.

RESUMO

A construção de barragens altera significativamente o regime hidrossedimentológico dos rios, promovendo assoreamento de reservatórios com redução do volume útil, comprometimento da vida útil e riscos operacionais, efeitos especialmente críticos em usinas a fio d'água. No Brasil, onde a geração hidrelétrica responde por cerca de 55,3% da eletricidade produzida, a gestão sedimentar assume caráter estratégico, embora iniciativas ativas de manejo ainda sejam incipientes. Destaca-se como exceção a UHE Aimorés, no rio Doce, que realiza manobras de Pass Through durante eventos de cheia, rebaixando o nível do reservatório para permitir que sedimentos em suspensão atravessem o sistema com mínima deposição. Entre 2018 e 2025 foram realizadas cinco operações com protocolos progressivamente consolidados. Este estudo avalia, com base em levantamentos topobatimétricos integrados, aerolevantamento com VANT e batimetria monofeixe e multifeixe, realizados entre 2007 e 2025, o comportamento do assoreamento e a efetividade dessas manobras. Os resultados apontam perda de 20% do volume útil no período 2007–2018, anterior às manobras, e de 11% em 2018–2025, com redistribuição espacial do assoreamento, indicando efetividade parcial do Pass Through na contenção da deposição nos trechos a montante do reservatório.

ABSTRACT

Dam construction significantly alters the hydro-sedimentological regime of rivers, promoting reservoir siltation with reduction of useful volume, compromise of

operational lifespan, and operational risks — effects especially critical in run-of-river plants. In Brazil, where hydroelectric generation accounts for approximately 55,3% of electricity production, sediment management assumes strategic importance, although active management initiatives remain limited. A notable exception is the Aimorés Hydroelectric Plant (UHE Aimorés), on the Doce River, which performs Pass Through maneuvers during flood events, lowering the reservoir level to allow suspended sediments to Pass Through the system with minimal deposition. Between 2018 and 2025, five operations were carried out with progressively consolidated protocols. This study evaluates, based on systematic topobathymetric surveys, integrating UAV aerial surveying and single-beam and multi-beam echo sounding, conducted between 2007 and 2025, the behavior of siltation and the effectiveness of these maneuvers. Results indicate a 20% loss of useful volume in the 2007–2018 period, prior to the maneuvers, and 11% in 2018–2025, with spatial redistribution of siltation across reservoir zones, suggesting partial effectiveness of Pass Through in containing deposition in the upstream reaches of the reservoir.

1. INTRODUÇÃO

A construção de barragens representa uma das formas mais intensas de modificação antrópica dos sistemas fluviais em escala global. Tais estruturas, concebidas prioritariamente para fins de geração de energia, controle de cheias, abastecimento hídrico e irrigação, promovem alterações significativas no regime hidrossedimentológico natural dos cursos d'água [1], [2]. No contexto brasileiro, o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) [3] registra mais de 29 mil barragens cadastradas, das quais mais de 1.300 destinam-se à geração de energia. A matriz elétrica nacional apresenta forte dependência da fonte hidráulica, responsável por cerca de 55,3% da eletricidade produzida no país [4], consolidando-se como o principal componente do setor. Nesse cenário, diversos estudos indicam que barramentos interrompem fluxos naturais de água e sedimentos, comprometendo processos geomorfológicos fundamentais à dinâmica fluvial [5], [6].

A entrada de sedimentos em reservatórios constitui um dos principais desafios operacionais dessas estruturas, intensificando processos de assoreamento. Esse fenômeno implica redução do volume útil armazenado, diminuição da vida útil dos empreendimentos e prejuízos ao desempenho energético [7], [8], [9]. Ademais, o acúmulo sedimentar pode afetar a segurança das barragens, uma vez que a diminuição da capacidade de armazenamento compromete o amortecimento de cheias, eleva solicitações estruturais e acelera o desgaste de componentes hidráulicos, como turbinas e válvulas [10], [11]. Esses efeitos tendem a ser mais pronunciados em usinas do tipo fio d'água, caracterizadas por reduzido volume de regularização e menor tempo de residência, o que favorece a rápida deposição de sedimentos, sobretudo nos estágios iniciais de operação [12].

A gestão de sedimentos em reservatórios está diretamente associada à preservação de sua funcionalidade, à eficiência operacional e à manutenção da continuidade hidrossedimentar dos sistemas fluviais. O represamento provoca redução abrupta da velocidade do escoamento e das tensões de cisalhamento, favorecendo a deposição progressiva de partículas, desde frações mais grossas em trechos a montante até sedimentos finos em zonas mais profundas [7]. Conforme [13], o barramento transforma o transporte sedimentar contínuo em um processo espacialmente compartimentado e assimétrico, com produção predominante a montante e retenção a jusante, resultando em desequilíbrios geomorfológicos e funcionais persistentes. Os efeitos cumulativos da sedimentação ao longo do tempo refletem-se na redução do volume útil e em alterações na geometria interna dos reservatórios, com taxas médias anuais de perda volumétrica entre 0,5% e 1,5% do volume total [7], podendo ser superiores em regiões tropicais sujeitas a intensa pressão antrópica. Esse quadro é particularmente relevante na bacia do rio Doce, onde o rompimento da barragem de Fundão, em novembro de 2015, introduziu volumes excepcionais de sedimentos no sistema, modificando a morfologia interna do reservatório de Aimorés e intensificando processos deposicionais [13], [14].

A literatura internacional converge para a necessidade de incorporar a gestão de sedimentos à operação regular dos reservatórios, considerando diferentes escalas espaciais e temporais [8], [15]. Nesse contexto, diversas técnicas podem ser empregadas, tanto para prevenir a deposição quanto para remover sedimentos já acumulados, destacando-se: bypass, pass-through, flushing e dragagem [7], [16]. Tais

estratégias podem ser agrupadas em quatro categorias principais: abordagens ativas baseadas em processos hidrodinâmicos, soluções estruturais, intervenções mecânicas corretivas e abordagens sistêmicas e baseadas na natureza, cada qual com requisitos operacionais, fundamentos hidráulicos e impactos ambientais específicos, conforme sintetizado na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo das estratégias de manejo sedimentar.

(i) Estratégias hidrodinâmicas ativas	Flushing	Rebaixamento do reservatório com liberação de altas vazões para remobilizar e exportar sedimentos depositados.
	Pass through/Sluicing	Operação com níveis baixos durante cheias para permitir a passagem de sedimentos sem deposição.
	Density current routing	Uso de correntes densimétricas de fundo para transportar sedimentos finos e evacuá-los por descargas profundas.
(ii) Estratégias estruturais permanentes	Bypass sedimentar	Desvio do fluxo sedimentado por túneis ou canais, evitando sua entrada no reservatório.
	Sediment traps	Estruturas a montante que retêm sedimentos grossos antes de atingirem o reservatório principal.
(iii) Intervenções mecânicas corretivas	Dragagem	Remoção mecânica ou hidráulica de sedimentos acumulados para recuperação do volume útil.
	Sediment trawling	Redistribuição subaquática de sedimentos por arraste, visando deslocamento para zonas de menor impacto.
(iv) Estratégias sistêmicas baseadas na natureza	Cascading sediment management	Operação integrada de reservatórios em cascata para otimizar retenção, transporte e liberação de sedimentos.
	Soluções baseadas na natureza	Ações na bacia (ex.: revegetação e controle de erosão) para reduzir a geração de sedimentos.
	Gestão da turbidez e qualidade da água	Controle operacional das tomadas d'água para minimizar impactos da carga sedimentar.

Entre as estratégias hidrodinâmicas ativas, o Pass Through baseia-se na manutenção de níveis operacionais reduzidos durante períodos de elevado aporte sedimentar, de modo a aumentar a capacidade de transporte do escoamento e permitir que os sedimentos em suspensão atravessem o reservatório com mínima deposição (Figura 1). Diferentemente do flushing, que visa remobilizar depósitos já consolidados por meio de rebaixamento intenso e liberação de altas vazões, o Pass Through atua de forma preventiva, buscando preservar a continuidade do transporte sedimentar antes que a deposição ocorra. Sua eficiência está diretamente relacionada à sincronização entre o hidrograma de cheia e a carga sedimentar afluente, sendo particularmente eficaz em bacias com regime hidrossedimentar sazonal, onde concentrações elevadas de sedimentos em suspensão estão associadas a eventos de cheia bem definidos [8], [16]. Experiências internacionais, como a operação do reservatório de Três Gargantas, na China, demonstram que a redução controlada do nível durante a estação chuvosa favorece a exportação significativa de sedimentos para jusante, contribuindo para a manutenção da capacidade de armazenamento ao longo do tempo [17]. Além disso, o método contribui para limitar a formação de deltas internos e a consolidação de sedimentos finos, apresentando, em geral, menores impactos ambientais quando comparado a estratégias mais agressivas [7], [15].

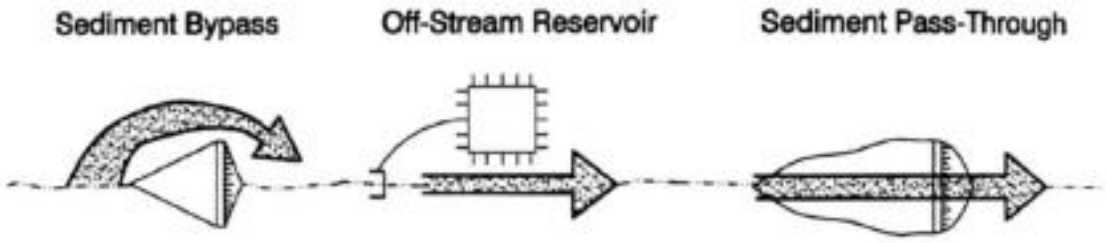


Figura 1 – Classificação das estratégias de roteamento de sedimentos (Adaptado de [7]).

A literatura especializada converge para a necessidade de selecionar estratégias de manejo sedimentar com base nas condições geomorfológicas, hidrológicas e operacionais de cada reservatório, admitindo a combinação de diferentes técnicas conforme o contexto de aplicação [7], [12], [16]. Reservatórios alongados e com maior declividade apresentam condições favoráveis à aplicação de flushing, enquanto sistemas com marcada sazonalidade na produção sedimentar tendem a se beneficiar mais do Pass Through. Em ambientes onde ocorrem correntes de densidade, estratégias de routing ou venting possibilitam a evacuação de sedimentos finos sem rebaixamentos expressivos, e soluções estruturais como o bypass são particularmente indicadas em novos empreendimentos com elevado aporte concentrado. Intervenções como a dragagem, por sua vez, apresentam caráter essencialmente corretivo, sendo mais adequadas para situações pontuais. Em sistemas hidrelétricos em cascata, a operação integrada dos reservatórios pode potencializar a eficiência do manejo sedimentar, promovendo melhor redistribuição dos materiais e mitigando impactos localizados.

No contexto brasileiro, a adoção de técnicas ativas de manejo sedimentar ainda é limitada, destacando-se como exceção a UHE Aimorés, situada no rio Doce, entre Minas Gerais e Espírito Santo. Nessa usina, são realizadas manobras operacionais do tipo Pass Through durante eventos de cheia, com o objetivo de permitir o escoamento da carga sedimentar em trânsito e reduzir a deposição no interior do reservatório [18], [19], [20]. Essa abordagem representa uma adaptação operacional do sluicing, amplamente discutido na literatura internacional, e configura uma oportunidade relevante para avaliação empírica com base em dados reais de operação em reservatório tropical de médio porte. Assim, este estudo avalia, com base em dados topobatimétricos coletados sistematicamente entre 2007 e 2025, o comportamento do assoreamento e a efetividade das manobras de Pass Through ao longo de diferentes períodos operacionais, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre gestão sedimentológica em reservatórios hidrelétricos brasileiros.

2. UHE AIMORÉS

2.1 Caracterização do empreendimento

A UHE Aimorés está localizada no rio Doce, na divisa dos municípios de Aimorés e Baixo Guandu, entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, respectivamente. A barragem está situada nas coordenadas geográficas (Lat.) 19°27’25”S e (Long.) 41°05’51”W, abrangendo uma área de drenagem de 62.362,8 km². A potência instalada da usina é de 330 MW e o volume do reservatório principal e auxiliar é de 182,99 hm³ no NA máximo normal. A área utilizada neste artigo abrange o entorno do reservatório pertencente ao barramento principal da UHE Aimorés (Figura 2).

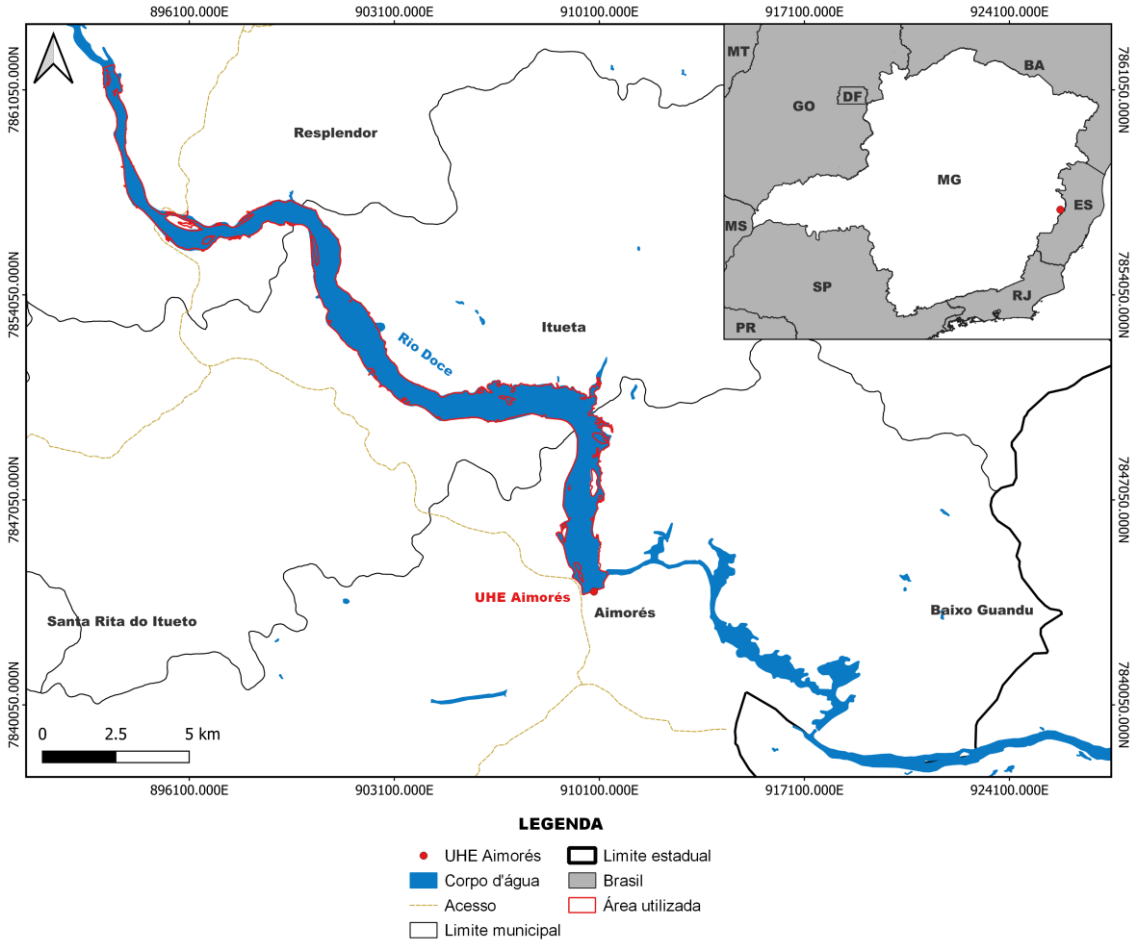


Figura 2 – Localização e área utilizada da UHE Aimorés.

No contexto da avaliação da suscetibilidade ao assoreamento, a análise do nível de criticidade do reservatório constitui uma etapa fundamental para a compreensão de seus impactos e condicionantes operacionais. O nível de criticidade (NC) de um reservatório resulta da integração entre o potencial de produção de sedimentos da bacia, a posição na cascata, o regime de operação e a magnitude dos impactos associados ao assoreamento, sendo classificado em baixo, médio ou alto [21]. Para a UHE Aimorés, considera-se potencial sedimentar médio, posição de média suscetibilidade na cascata e elevada importância dos impactos, devido à influência

sobre áreas urbanas e infraestruturas regionais. O regime operacional, caracterizado por baixo índice de regularização, indica menor capacidade de retenção prolongada de sedimentos. A combinação desses fatores resulta em classificação de criticidade média, embora estudos indiquem que processos de assoreamento podem afetar a capacidade hidráulica e os usos múltiplos da água, exigindo monitoramento contínuo [1], [8].

A bacia do rio Doce é geologicamente controlada pelo Orógeno Araçuaí, formado durante a colisão neoproterozóica entre os crátons São Francisco e Congo, sendo composta majoritariamente por rochas cristalinas de médio a alto grau metamórfico, como gnaisses e migmatitos [22], [23]. Sobre esse embasamento ocorrem unidades metavulcano-sedimentares do Grupo Rio Doce, com xistos, quartzitos e metagrauvacas, que apresentam elevada anisotropia estrutural e maior suscetibilidade à erosão [24], [25]. Destaca-se ainda o Complexo Charnockítico de Aimorés, de origem ígnea pós-colisional, com boas propriedades geotécnicas [26], além de depósitos sedimentares recentes na porção jusante, compostos por materiais inconsolidados altamente suscetíveis à remobilização [23], [27]. Essa heterogeneidade litológica controla a dinâmica hidrossedimentológica regional, influenciando a produção, transporte e deposição de sedimentos em reservatórios [25].

2.2 Pass Through

As manobras de Pass Through realizadas na UHE Aimorés consistem no rebaixamento controlado do nível do reservatório durante eventos de cheia, de modo a favorecer o escoamento da carga sedimentar em trânsito e reduzir a deposição no interior do reservatório. Diferentemente do flushing, que visa remobilizar sedimentos já depositados, o Pass Through atua de forma preventiva, mantendo o nível operacional reduzido durante os períodos de maior aporte sedimentar, permitindo que os sedimentos em suspensão atravessem o reservatório com mínima deposição. A efetividade da manobra está diretamente associada à sincronização entre o hidrograma de cheia e a carga sedimentar afluente, sendo o reservatório rebaixado preferencialmente durante o pico hidrológico, quando as concentrações de sedimentos em suspensão são mais elevadas.

Entre os anos de 2018 e 2025, foram realizadas cinco operações de Pass Through na UHE Aimorés, evidenciando uma trajetória de evolução progressiva tanto em termos operacionais quanto institucionais. A manobra, realizada entre 07 e 10 de fevereiro de 2018, foi conduzida durante evento de cheia com vazões da ordem de 3.000 m³/s e representou o marco inicial da aplicação sistematizada dessa técnica na usina, com estabelecimento dos primeiros protocolos de comunicação institucional, monitoramento limnológico e acompanhamento sedimentológico. Em 2020, a operação realizada entre 26 e 31 de janeiro demonstrou avanço significativo em termos de articulação com órgãos reguladores, incluindo ANA, IBAMA e defesas civis, além de maior integração com levantamentos topobatimétricos como suporte à tomada de decisão.

A manobra de 2021, conduzida em fevereiro, consolidou os procedimentos operacionais, com ajuste dos limiares de acionamento para vazões em torno de

2.000 m³/s, refletindo o aprendizado acumulado nos anos anteriores. O ano de 2022 marcou um avanço importante com a realização de duas operações distintas, entre 05 e 19 de janeiro e entre 12 e 25 de fevereiro, evidenciando a capacidade de adaptação da estratégia a contextos hidrológicos com eventos de cheia sucessivos e maior integração com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Por fim, a operação de 2023 consolidou o Pass Through como prática plenamente incorporada à rotina operacional da usina, com sistemas de monitoramento bem estruturados, incluindo controle de qualidade da água, acompanhamento da ictiofauna e atualização contínua das condições morfossedimentares do reservatório.

Ressalta-se que nos anos de 2019, 2024 e 2025 não foram realizadas manobras de Pass Through, seja por ausência de eventos hidrológicos com vazões suficientes para acionamento da operação, seja por condicionantes operacionais e regulatórias. Esses anos sem manobra constituem períodos de referência importantes para a análise, pois permitem caracterizar o comportamento natural do assoreamento em condições de operação convencional e estabelecer um contraste direto com os efeitos promovidos pelas descargas controladas, contribuindo para uma avaliação mais robusta da efetividade da técnica ao longo do período monitorado.

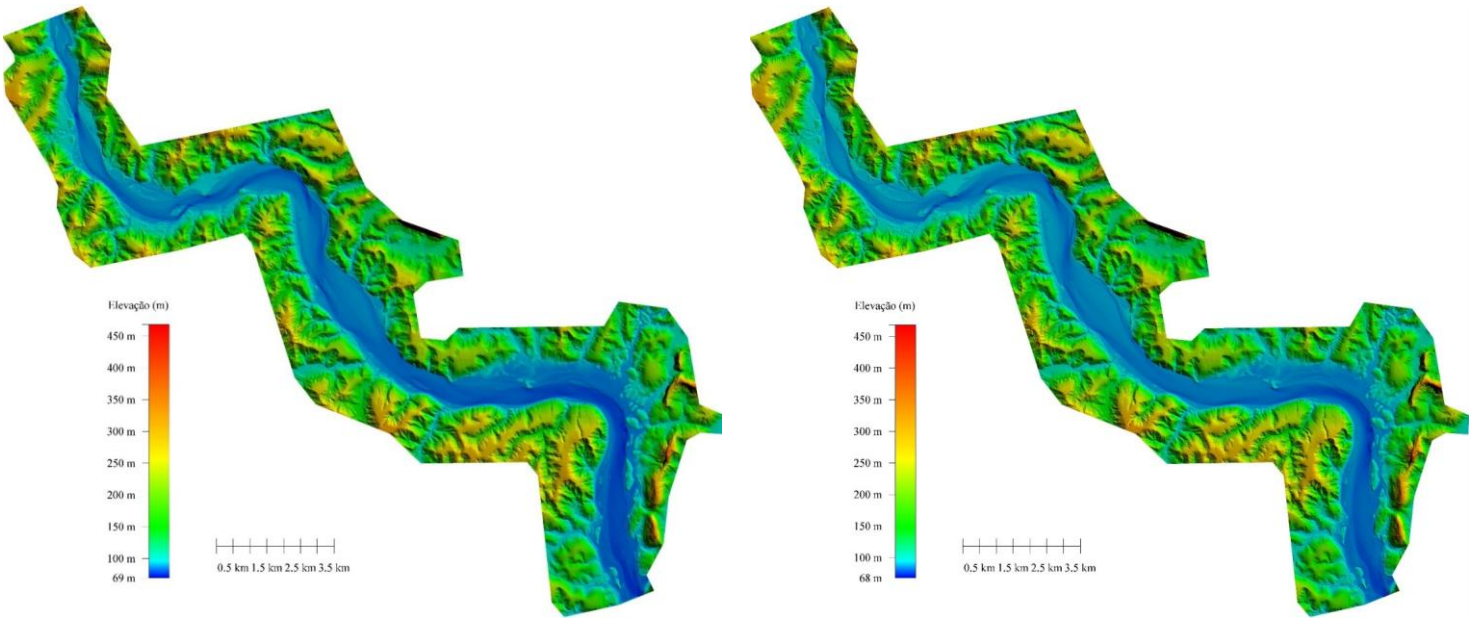
2.3 Levantamentos topobatimétricos integrados

Os Modelos Digitais de Terreno (MDTs) gerados a partir dos levantamentos topobatimétricos realizados entre 2018 e 2025 constituem a principal ferramenta de representação morfológica do reservatório da UHE Aimorés. Esses modelos foram obtidos por meio da integração entre duas metodologias complementares: aerolevantamento com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para as áreas emersas e batimetria para a calha submersa, resultando em uma superfície contínua e georreferenciada com resolução espacial de 1 m.

O aerolevantamento foi executado com o VANT modelo Echar 20C, equipado com sistema de posicionamento GNSS com tecnologia RTK embarcado e sensor óptico RGB Full Frame de 36 megapixels, permitindo a obtenção de imagens com resolução centimétrica (GSD da ordem de centímetros). O levantamento cobriu uma área de aproximadamente 16.771 hectares, distribuída em 23 voos com duração média de 1h30 cada, com sobreposição lateral de 60% e longitudinal de 75%, assegurando redundância geométrica suficiente para a reconstrução tridimensional da superfície. As imagens foram processadas no software Pix4D, gerando ortofoto, nuvem de pontos e MDT. A nuvem de pontos foi classificada para separar o terreno de elementos como vegetação, e o MDT resultante representa exclusivamente a superfície natural do relevo.

Para as campanhas de 2018 a 2024, o levantamento batimétrico foi realizado com ecobatímetro monofeixe, metodologia amplamente aplicada em reservatórios pela sua confiabilidade em áreas rasas e de geometria irregular. A campanha de 2025 incorporou também o ecobatímetro multifeixe acoplado a um veículo de superfície não tripulado, permitindo maior densidade espacial de dados nas áreas mais profundas. Em ambos os casos, a determinação da cota altimétrica dos pontos batimétricos foi feita pela integração entre a profundidade medida pela sonda e o nível d'água observado no momento do levantamento, com posicionamento centimétrico por

receptor GNSS em modo RTK. Todos os dados altimétricos foram convertidos de altitudes geométricas para ortométricas por meio de um Modelo Geoidal Local (MGL) desenvolvido especificamente para a área de estudo, com coeficiente de determinação R^2 de 0,893 e erro médio de validação de aproximadamente 0,021 m, garantindo a compatibilidade entre as diferentes fontes de dados e o sistema altimétrico oficial brasileiro. Os produtos gerados foram classificados como Classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Digitais (PEC-PCD), atestando elevado nível de acurácia posicional (Figura 3).



(a) Modelo Digital de Terreno (março/2018). (b) Modelo Digital de Terreno (junho/2025).

Figura 3 – MDTs utilizados.

A comparação entre os MDTs de 2018 e 2025 já permite identificar, visualmente, alterações expressivas na geometria do fundo ao longo do período analisado, especialmente nos trechos centrais e próximos ao barramento. Essa capacidade de representar com precisão a superfície do reservatório em diferentes momentos é o que torna o levantamento topobatimétrico uma ferramenta indispensável no monitoramento de reservatórios sujeitos a processos de assoreamento: sem essa base de dados sistemática, variações volumétricas e morfológicas de grande relevância operacional, e que condicionam diretamente a efetividade de manobras como o Pass Through, permaneceriam invisíveis à gestão.

2.4 Avaliação da efetividade do Pass Through

Para uma análise mais direcionada, foi realizado o zoneamento do reservatório da UHE Aimorés, definido com base nas características hidrodinâmicas e sedimentológicas de cada trecho, segmentando o sistema em seis unidades com comportamento deposicional distinto: zona de remanso, zona da cidade, zona dos bancos, zona de risco, zona intermediária e zona do barramento (Figura 4). Essa compartimentação é essencial para que os dados topobatimétricos sejam

interpretados de forma contextualizada, uma vez que reservatórios com geometria alongada, como Aimorés, apresentam gradiente longitudinal de energia que condiciona padrões espacialmente heterogêneos de deposição e remobilização de sedimentos. Em trechos a montante, a maior velocidade do escoamento favorece a deposição de frações mais grossas, enquanto as zonas intermediária e do barramento, caracterizadas por menor energia hidráulica, tendem a acumular sedimentos finos e depósitos coesivos, padrão que se altera dinamicamente em função das manobras operacionais realizadas.

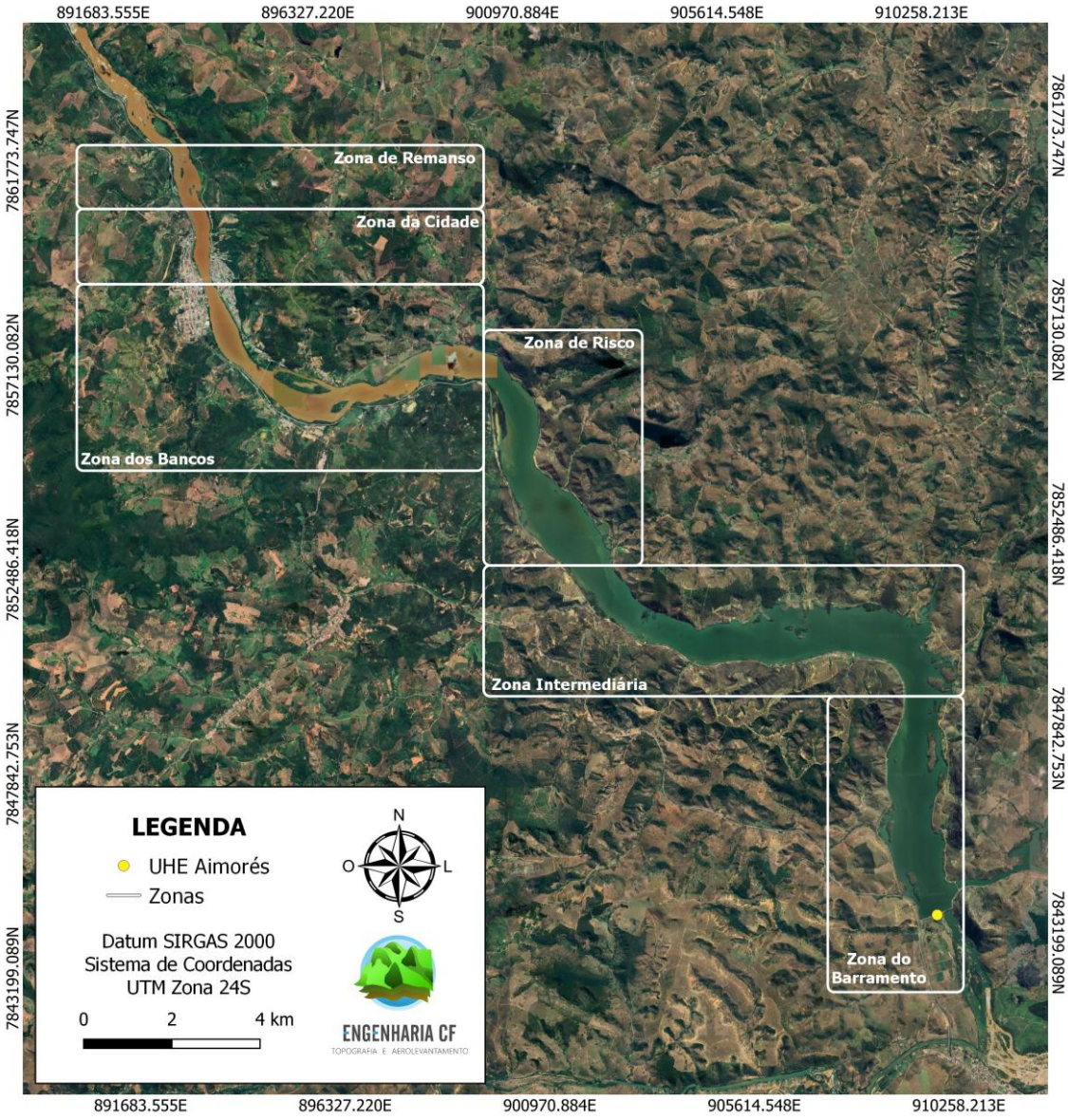


Figura 4 – Zoneamento do reservatório da UHE Aimorés.

Ao associar os volumes calculados por zona aos períodos com e sem manobras de Pass Through, torna-se possível identificar quais setores concentram o assoreamento, em que ritmo ele avança e como a morfologia do fundo responde às descargas controladas. Essa abordagem zonal, sustentada pelos levantamentos topobatimétricos sistemáticos, constitui a base metodológica para a avaliação

empírica da efetividade das cinco manobras realizadas entre 2018 e 2025, permitindo distinguir os efeitos operacionais das tendências naturais de deposição e comparar diretamente os dois períodos analisados, antes e após a sistematização do Pass Through. Sem essa base de dados com cobertura espacial contínua e resolução adequada, variações morfológicas entre zonas adjacentes e sua evolução temporal permaneceriam indiscerníveis, inviabilizando qualquer avaliação empírica das manobras de gestão sedimentar. Para fins de validação da comparação, foram utilizados dados batimétricos referentes ao ano de 2007, período anterior à realização de quaisquer manobras de intervenção no reservatório.

A Tabela 2 apresenta os volumes e áreas do reservatório por zona para os anos de 2007, 2018 e 2025, na cota 90 m, correspondente ao Nível de Água (NA) Máximo Normal da usina. A Tabela 3 sintetiza as diferenças volumétricas entre os períodos analisados, expressas em valores absolutos, percentuais e taxas médias anuais de assoreamento, permitindo a comparação direta entre dois períodos operacionais distintos: 2007–2018, anterior à sistematização das manobras de Pass Through, e 2018–2025, que compreende a realização de cinco operações de descarga controlada.

Tabela 2 – Volume total e por zonas do ano de 2007 e das campanhas de 2018 e 2025.

ZONAS	2007		2018		2025	
	Área (ha)	Volume (hm³)	Área (ha)	Volume (hm³)	Área (ha)	Volume (hm³)
Zona de Remanso	53,57	1,27	55,58	1,14	57,09	1,12
Zona da Cidade	53,98	2,63	54,32	2,12	54,66	1,92
Zona dos Bancos	423,17	19,78	427,60	15,64	432,81	14,93
Zona de Risco	490,77	26,26	487,76	17,66	489,97	16,86
Zona Intermediária	845,35	58,38	845,79	49,36	851,34	42,51
Zona do Barramento	491,79	41,05	495,35	38,30	498,90	34,17
TOTAL	**-**	**149,38**	**-**	**124,23**	**-**	**111,52**

Tabela 3 – Diferenças por zona entre os volumes de 2018 e 2007 e os de 2025 e 2018.

ZONAS	2018		Média anual (2018-2007) (hm³)	2025		Média anual (2025-2018) (hm³)
	Assoreamento (hm³)	%		Assoreamento (hm³)	%	
Zona de Remanso	0,13	11%	0,012	0,03	2%	0,004
Zona da Cidade	0,51	24%	0,046	0,20	11%	0,029
Zona dos Bancos	4,14	26%	0,376	0,71	5%	0,101
Zona de Risco	8,60	49%	0,782	0,80	5%	0,114
Zona Intermediária	9,02	18%	0,820	6,85	16%	0,978
Zona do Barramento	2,75	7%	0,250	4,13	12%	0,590
TOTAL	**25,14**	**20%**	**2,286**	**12,72**	**11%**	**1,817**

No período de 2007 a 2018, o reservatório perdeu 25,14 hm³ de volume útil, correspondendo a uma redução de aproximadamente 20% em relação ao volume registrado em 2007 (149,38 hm³), com taxa média anual de assoreamento de 2,29 hm³/ano. Esse período é marcado pela ausência de manobras sistemáticas de gestão sedimentar e inclui o aporte extraordinário de sedimentos associado ao

rompimento da barragem de Fundão, em novembro de 2015 [14], evento que introduziu volumes anômalos no sistema e intensificou os processos deposicionais em Aimorés [13]. As zonas mais impactadas foram a Zona de Risco, com perda de 8,60 hm³ e redução de 49% do volume original, e a Zona Intermediária, com redução de 9,02 hm³ (18%), evidenciando intensa deposição nos trechos centrais do reservatório, onde a perda de energia do escoamento favorece a sedimentação de frações mais finas. A Zona dos Bancos também registrou perda expressiva de 4,14 hm³ (26%), indicando deposição relevante nos trechos de menor profundidade e maior variação morfológica.

No período de 2018 a 2025, que compreende a realização das manobras de Pass Through nos anos de 2018, 2020, 2021, 2022 e 2023, a perda volumétrica total foi de 12,72 hm³, representando redução de aproximadamente 11% em relação ao volume de 2018, com taxa média anual de 1,82 hm³/ano. Embora a taxa anual absoluta permaneça elevada, a análise por zonas revela padrão espacial substancialmente distinto em relação ao período anterior. As zonas de Risco e dos Bancos apresentaram reduções percentuais significativamente menores, 5% em ambos os casos, indicando contenção da deposição nos trechos onde a técnica tende a ser mais efetiva, pelo aumento da capacidade de transporte durante os eventos de cheia. A Zona de Remanso também registrou perda percentual reduzida (2%), sugerindo menor acúmulo nos trechos mais a montante do reservatório.

Por outro lado, observa-se concentração do assoreamento nas zonas Intermediária e do Barramento, com perdas de 6,85 hm³ (16%) e 4,13 hm³ (12%), respectivamente, e taxas anuais superiores às registradas no período anterior, 0,978 hm³/ano e 0,590 hm³/ano, contra 0,820 hm³/ano e 0,250 hm³/ano. Esse comportamento sugere redistribuição espacial dos depósitos sedimentares, com possível migração do material em direção ao setor próximo ao barramento, padrão compatível com mecanismos de transporte por correntes de densidade e progressão deltaica descritos na literatura para reservatórios tropicais [7], [12], [13].

A análise quantitativa das tabelas é complementada pela avaliação espacial derivada da subtração entre os MDTs de 2025 e 2018. Enquanto as tabelas expressam as variações volumétricas agregadas por zona, os mapas de diferença permitem identificar a distribuição interna dos processos de deposição e remobilização dentro de cada setor do reservatório (Figura 5 até Figura 11). Essa integração entre abordagem volumétrica e espacial é fundamental para interpretar os mecanismos hidrossedimentológicos subjacentes às manobras de Pass Through, uma vez que perdas volumétricas similares entre zonas podem corresponder a padrões morfológicos substancialmente distintos, como a formação de novos bancos, o aprofundamento do talvegue ou a migração de depósitos ao longo do eixo longitudinal do reservatório. Os mapas de subtração evidenciam predomínio de assoreamento ao longo do talvegue principal e nas zonas mais próximas ao barramento, enquanto os setores a montante, especialmente nas zonas dos Bancos e de Risco, exibem padrão mais heterogêneo, com alternância de acúmulo e remobilização de sedimentos, indicativo de dinâmica mais ativa associada às descargas controladas.

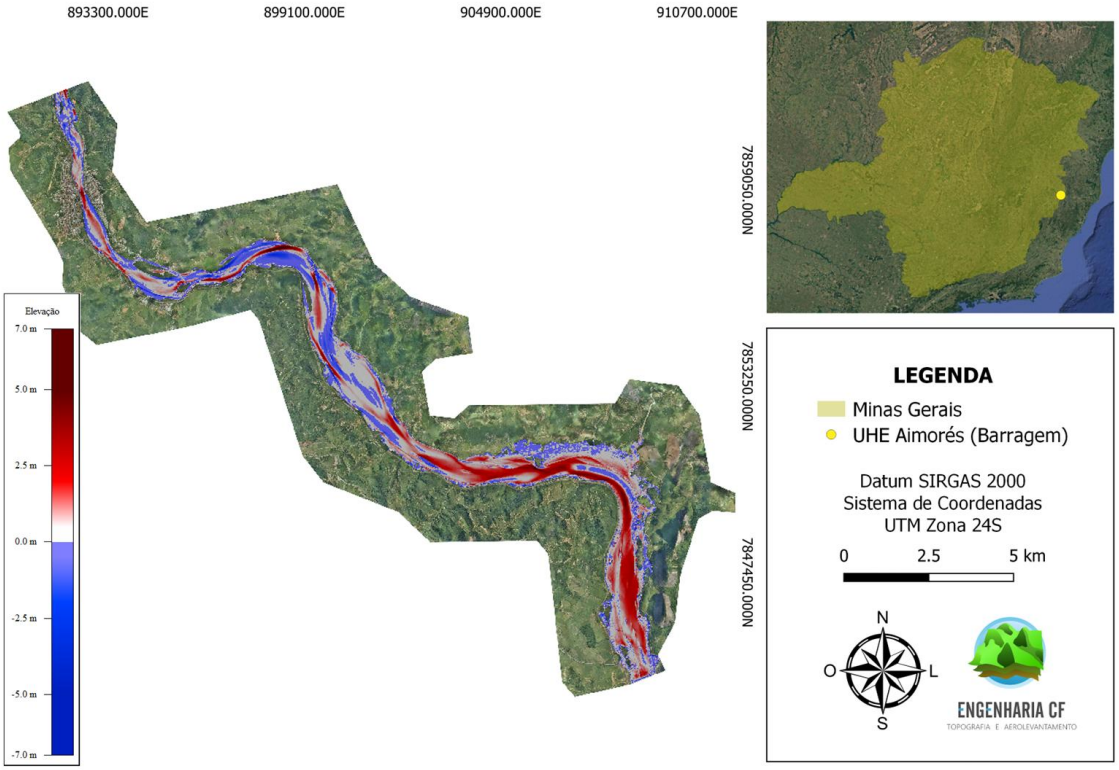


Figura 5 – Subtração entre os MDTs de 2025 – 2018.

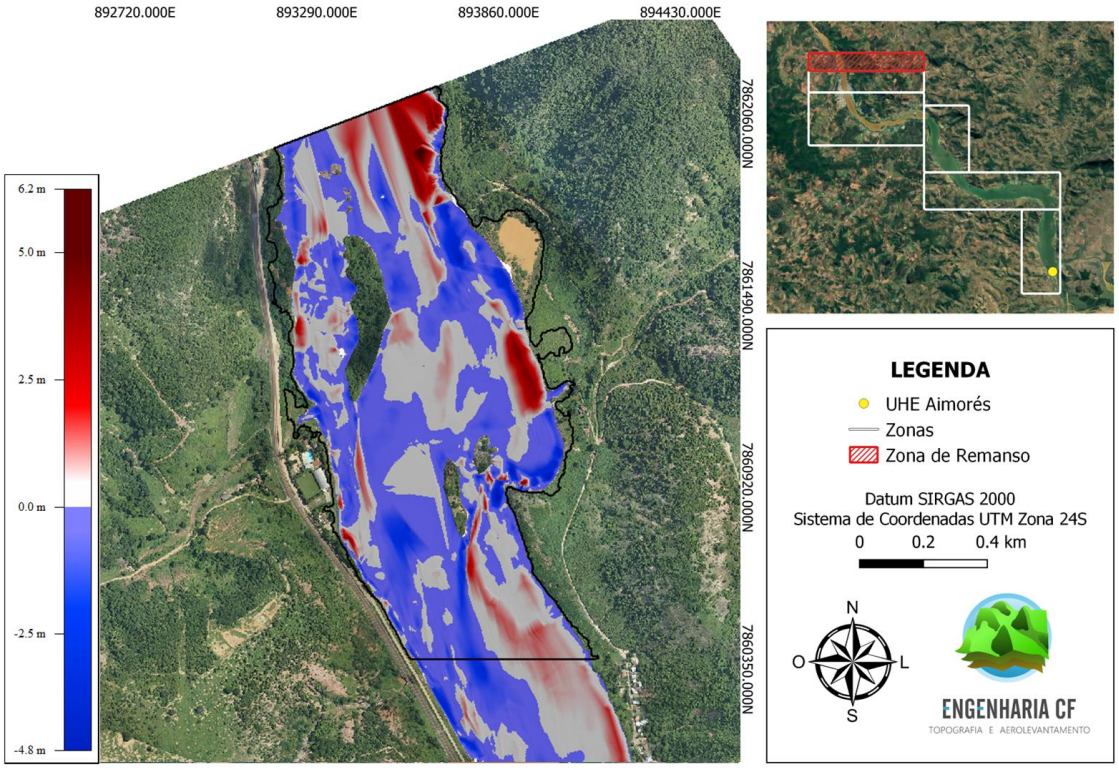


Figura 6 – Subtração entre os MDTs de 2025 – 2018 (Zona de Remanso).

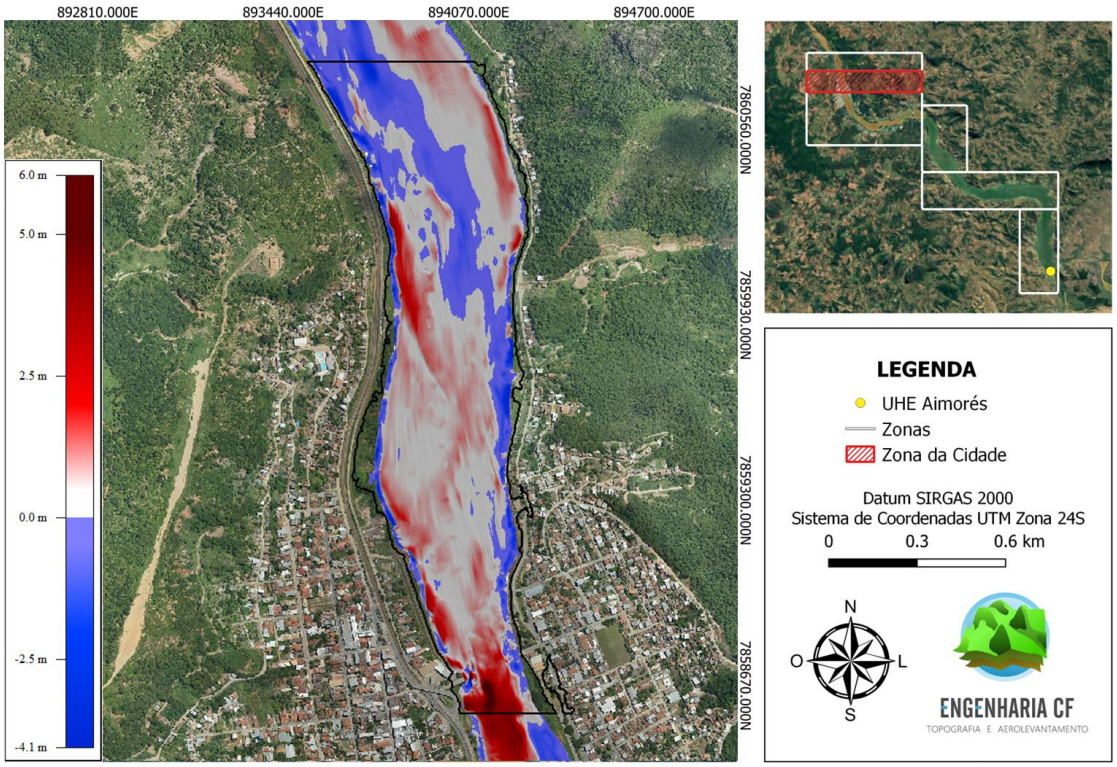


Figura 7 – Subtração entre os MDTs de 2025 – 2018 (Zona da Cidade).

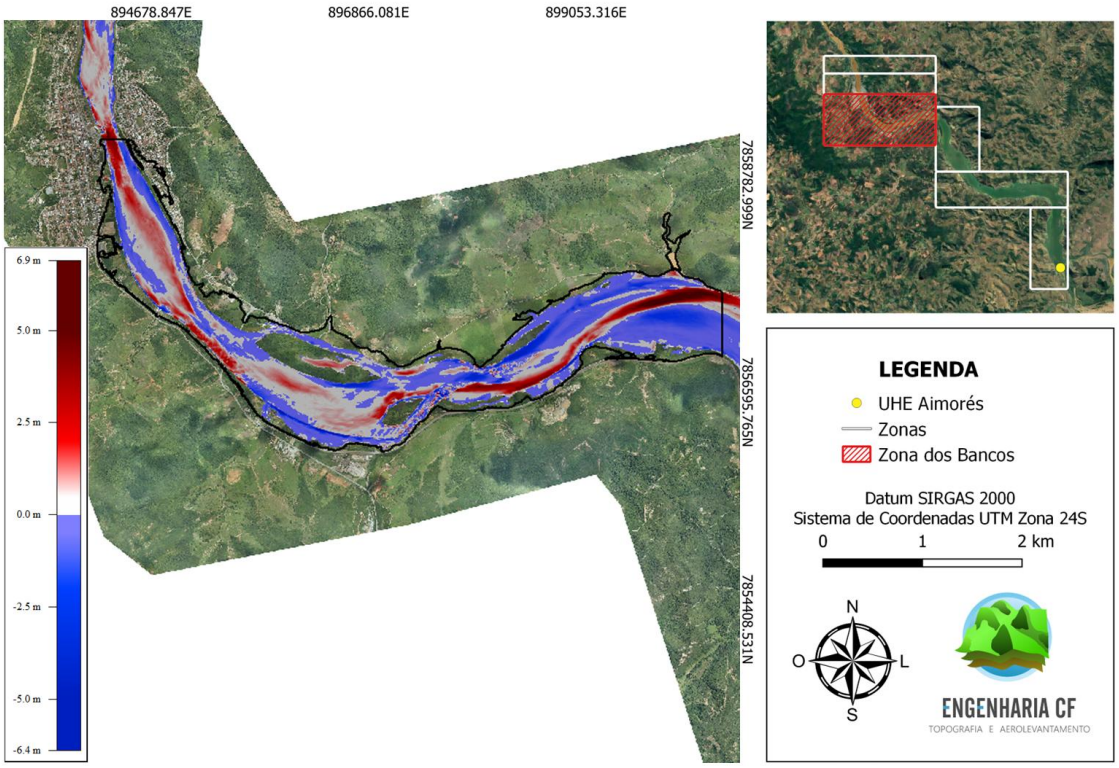


Figura 8 – Subtração entre os MDTs de 2025 – 2018 (Zona dos Bancos).

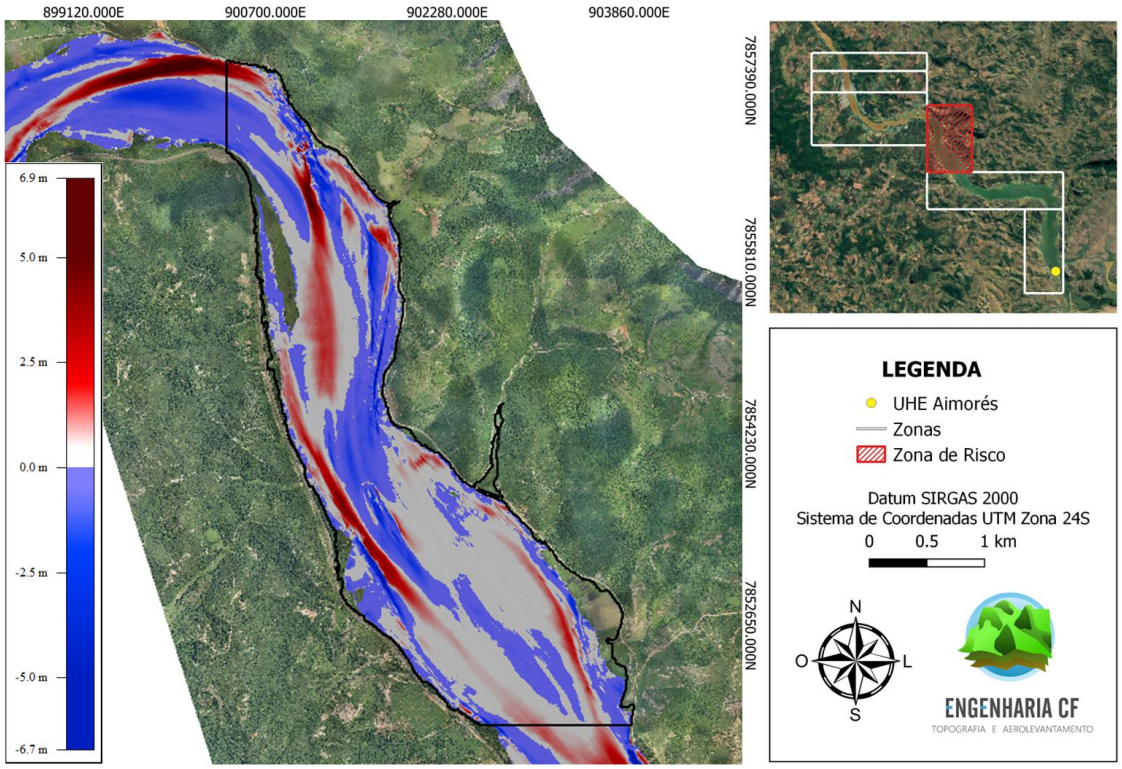


Figura 9 – Subtração entre os MDTs de 2025 – 2018 (Zona de Risco).

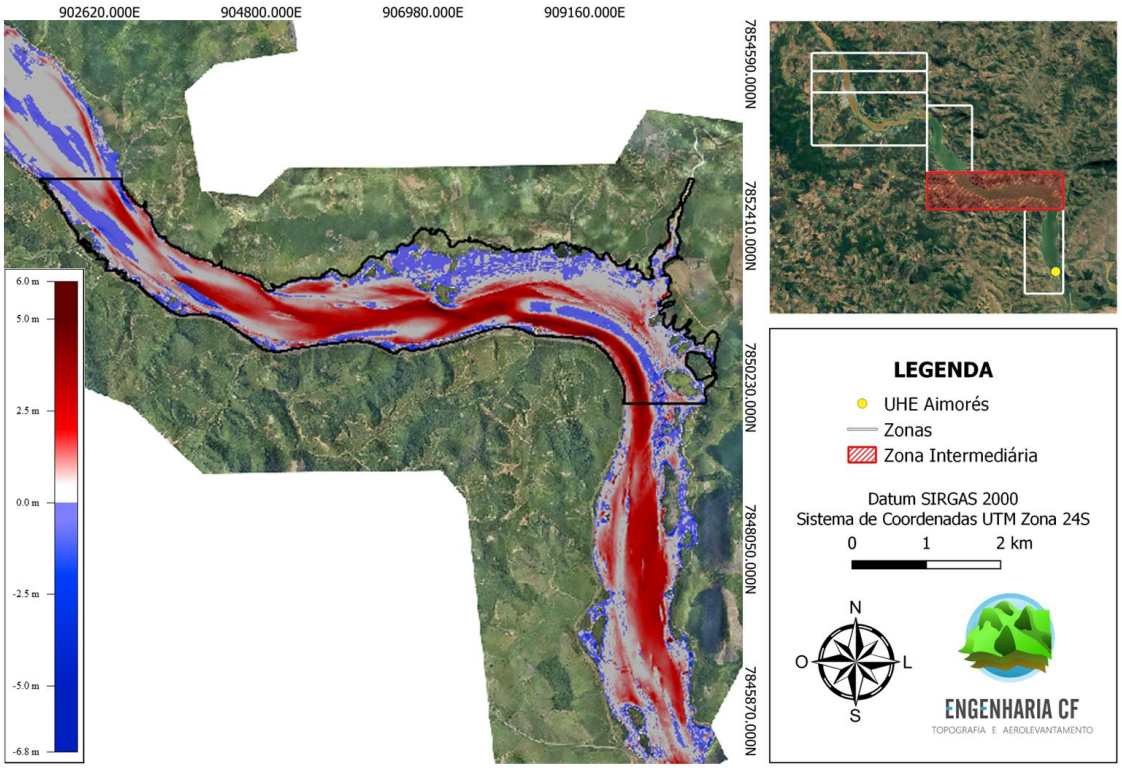


Figura 10 – Subtração entre os MDTs de 2025 – 2018 (Zona Intermediária).

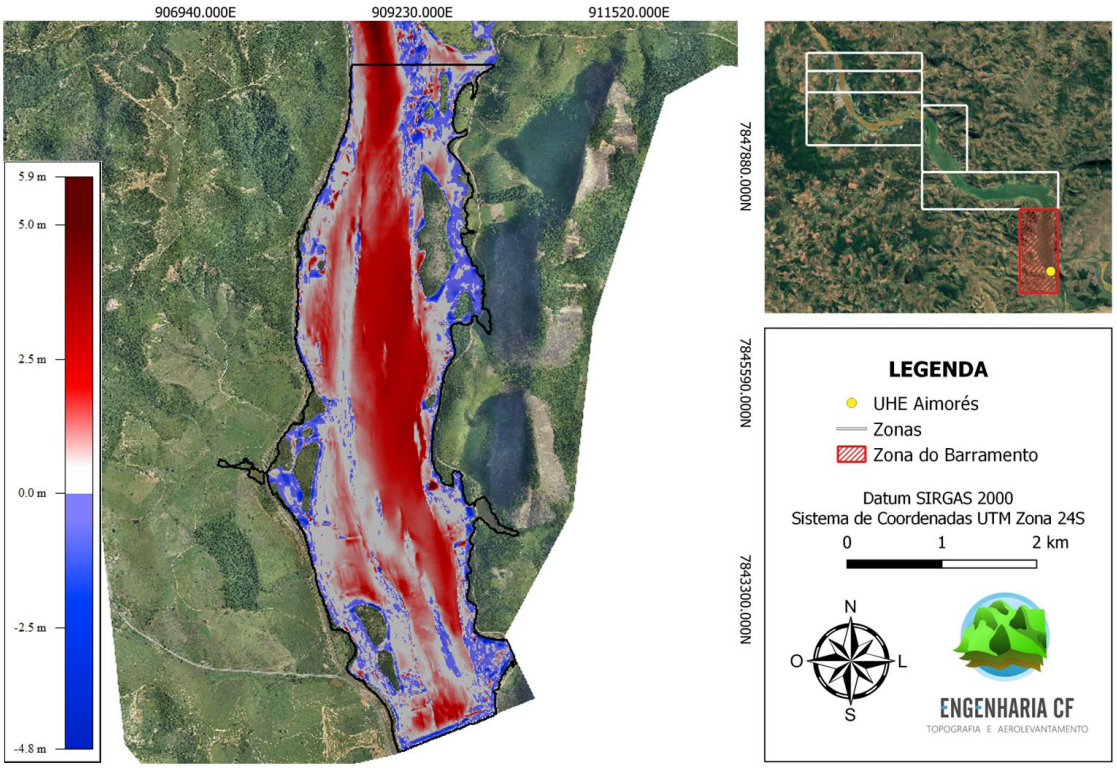


Figura 11 – Subtração entre os MDTs de 2025 – 2018 (Zona do Barramento).

3. CONCLUSÕES

A análise dos dados topobatimétricos coletados no reservatório da UHE Aimorés entre 2007 e 2025 permitiu avaliar a evolução do assoreamento ao longo de dois períodos operacionais distintos e identificar os efeitos das manobras de Pass Through sobre a dinâmica sedimentar do reservatório.

No período de 2007 a 2018, anterior à sistematização das manobras, o reservatório registrou perda volumétrica de 25,14 hm³, correspondente a 20% do volume total, com taxa média anual de 2,29 hm³/ano. Esse quadro reflete tanto o regime natural de aporte sedimentar da bacia do rio Doce quanto os efeitos do evento extraordinário do rompimento de Fundão [14], que introduziu volumes anômalos de sedimentos no sistema. As zonas de Risco e Intermediária concentraram os maiores volumes depositados, com perdas percentuais de 49% e 18%, respectivamente, evidenciando intensa deposição nos trechos centrais do reservatório.

No período de 2018 a 2025, marcado pela realização sistemática de cinco manobras de Pass Through, a perda volumétrica total foi de 12,72 hm³, representando redução de 11% do volume, com taxa média anual de 1,82 hm³/ano. Embora a taxa absoluta permaneça expressiva, a análise por zonas revela padrão espacial substancialmente distinto: as zonas historicamente mais impactadas (Zonas de Risco e dos Bancos) apresentaram reduções percentuais significativamente menores (5% em ambos os casos), indicando contenção da deposição nos trechos onde a técnica tende a ser mais efetiva. Em contrapartida, observou-se incremento do assoreamento nas zonas Intermediária e do Barramento, com taxas anuais superiores às do período anterior,

sugerindo redistribuição espacial dos depósitos sedimentares em direção ao setor mais próximo ao barramento, padrão compatível com mecanismos de progressão deltaica e transporte por correntes de densidade descritos na literatura [7], [12], [13].

Os resultados indicam que as manobras de Pass Through contribuíram para a contenção do assoreamento nas zonas de maior impacto operacional e para a preservação parcial da capacidade de transporte nos trechos superiores do reservatório. Ao mesmo tempo, o incremento da deposição nas zonas mais próximas ao barramento aponta para a necessidade de estratégias complementares de gestão sedimentar, como operações de flushing ou dragagem localizada, que atuem sobre os depósitos consolidados nessa região.

Em termos metodológicos, a abordagem topobatimétrica integrada, combinando aerolevantamento com VANT, batimetria monofeixe e multifeixe e Modelo Geoidal Local, demonstrou ser adequada para o monitoramento evolutivo de reservatórios, fornecendo base de dados consistente para análises volumétricas e identificação de padrões morfossedimentares. A classificação dos produtos na Classe A do PEC-PCD assegura a confiabilidade das comparações realizadas entre campanhas e reforça a importância dos levantamentos topobatimétricos sistemáticos como instrumento essencial de suporte à gestão operacional e sedimentar de reservatórios hidrelétricos.

Por fim, os resultados obtidos consolidam a UHE Aimorés como estudo de caso de referência para a avaliação empírica de técnicas de manejo sedimentar em reservatórios tropicais de médio porte, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre a efetividade do Pass Through e para a formulação de diretrizes operacionais mais robustas no âmbito da gestão hidrossedimentológica de usinas hidrelétricas brasileiras.

4. PALAVRAS-CHAVE

Barragens, Assoreamento, Topobatimetria, Pass Through, UHE Aimorés.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CARVALHO, N. O. (2008) – “Hidrossedimentologia prática”, livro técnico, 2ª edição revisada e ampliada, Rio de Janeiro, Brasil.

[2] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD (2009) – “Sedimentation and sustainable use of reservoirs and river systems”, Bulletin 147 (Draft), Comissão Internacional de Grandes Barragens, [s.l.].

[3] SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS – SNISB (2025) – “Relatório de segurança de barragens 2025”, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Brasília, Brasil.

[4] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME (2025) – “Balanço Energético Nacional”, relatório institucional, Brasília, Brasil.

[5] PETTS, G. E.; GURNELL, A. M. (2005) – “Dams and geomorphology: research progress and future directions”, periódico Geomorphology, volume 71, pp. 27–47.

[6] GRANT, G. E.; SCHULTZ, C.; LEWIS, S. A. (2003) – “A geological framework for interpreting downstream effects of dams on rivers”, capítulo de livro em A Peculiar River: Geology, Geomorphology, and Hydrology of the Deschutes River, Oregon, American Geophysical Union, Washington, EUA.

[7] MORRIS, G. L.; FAN, J. (1998) – “Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs and watersheds for sustainable use”, livro técnico, New York, EUA.

[8] WANG, Z. Y.; HU, C. (2009) – “Strategies for managing reservoir sedimentation”, periódico International Journal of Sediment Research, volume 24, número 4, pp. 369–384.

[9] CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. (2000) – “Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios”, relatório técnico, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, Brasil.

[10] MENESCAL, R. A. (2005) – “A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil”, livro técnico, 2ª edição, Brasília, Brasil.

[11] COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS – CBDB (2009) – “Main Brazilian Dams III: design, construction and performance”, publicação técnica, ICOLD Publications, Brasil.

[12] ANNANDALE, G. W.; MORRIS, G. L.; KARKI, P. (2016) – “Extending the life of reservoirs: sustainable sediment management for dams and run-of-river hydropower”, livro técnico, World Bank Group, Washington, EUA.

[13] GOULART, C. (2020) – “Análise de sensibilidade aos parâmetros adotados e das incertezas associadas à modelagem hidrodinâmica e de gestão de sedimentos no reservatório da UHE Aimorés”, dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

[14] INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA (2015) – “Laudo técnico preliminar: impactos ambientais decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais”, relatório técnico, Brasília, Brasil.

[15] WHITE, W. R. (2001) – “Evacuation of sediment from reservoirs”, livro técnico, Thomas Telford, London, Reino Unido.

[16] KONDOLF, G. M.; GAO, Y.; ANNANDALE, G. W.; MORRIS, G. L.; JIANG, E.; ZHANG, J. et al. (2014) – “Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: experiences from five continents”, periódico Earth’s Future, volume 2, número 5, pp. 256–280.

[17] REN, S.; ZHANG, B.; WANG, W.-J.; YUAN, Y.; GUO, C. (2021) – “Sedimentation and its response to management strategies of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River, China”, periódico CATENA.

[18] CARVALHO, C. J. (2018) – “Operação Pass Through - UHE Aimorés”, anais do Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (12) e Particles in the Americas (1),

Vitória, Brasil.

[19] ABREU, A. S. (2019) – “Análise experimental em modelo físico de estruturas hidráulicas de remoção de sedimentos em barragens: descarregadores de fundo”, dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil.

[20] FAN, F. M.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; REIS, A. A.; BOTELHO, L. C. M. (2015) – “Previsão de vazão por ensemble para a UHE Aimorés no rio Doce”, anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (21), Brasília, Brasil.

[21] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA (2013) – “Orientações para atualização das curvas cota x área x volume”, relatório técnico, Brasília, Brasil.

[22] PEDROSA-SOARES, A. C.; NOCE, C. M.; ALMEIDA, J. C. H.; ALKMIM, F. F. (2001) – “O sistema orogênico Araçuaí: síntese geológica e evolução tectônica”, periódico Revista Brasileira de Geociências, volume 31, número 3, pp. 122–140.

[23] SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM (2020) – “Mapa Geológico do Brasil ao Milionésimo: folhas SE.24 e SF.24”, mapa geológico, Brasília, Brasil.

[24] SALINO, V. S. (2007) – “Significado do Grupo Rio Doce no contexto do Orógeno Araçuaí”, tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

[25] AUSTINO, A. B. (2015) – “Caracterização geomorfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Doce”, trabalho acadêmico, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil.

[26] BILAL, E.; MACHADO, R.; TEIXEIRA, W. (2014) – “Petrografia e geoquímica do Complexo Charnockítico de Aimorés (MG-ES): implicações para o magmatismo pós-colisional do Orógeno Araçuaí”, periódico Revista Brasileira de Geociências, volume 44, número 3, pp. 489–504.

[27] INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – IEMA (2010) – “Relatório técnico: geologia e geomorfologia da faixa costeira do Espírito Santo”, relatório técnico, Vitória, Brasil.



Sarah Crivellaro Maciel FALEIROS

Engenheira Geóloga pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Sócia da empresa Engenharia CF. Possui experiência profissional com elaboração de projetos relacionados a serviços de batimetria, topografia e aerolevantamento.



Priscila Maria KIPPER

Engenheira Hídrica e Mestra em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Atua como Engenheira na empresa Engenharia CF. Possui experiência acadêmica em pesquisas com ênfase em segurança de barragens e experiência profissional em consultoria de projetos.



Gabriel Fonseca FALEIROS

Engenheiro de Controle e Automação pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Sócio-Administrador da empresa Engenharia CF. Possui experiência profissional com elaboração de projetos e serviços de batimetria, topografia e aerolevantamento.



Cleber José de CARVALHO

Graduado em Engenharia Civil em 1988, com especialização em Engenharia de Barragens em 2001 (UFOP). Coordenou o laboratório de solos da Cemig de 1997 a 2006. A partir de 2017, atua pela Aliança Energia S.A., proprietária de 6 barragens: Igarapava, Amador Aguiar I e II, Funil, Aimorés, Porto Estrela e Risoleta Neves, na área de segurança de barragens.



Ana Paula Borges MARCELINO

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Mestra e Doutora pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Trabalha como Engenheira na Aliança Geração de Energia. Atuação com ênfase em concreto, patologia das estruturas e segurança de barragem.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

DESCOMISSIONAMENTO DE BARRAGENS DE MÚLTIPLOS USOS: ABORDAGEM REGULATÓRIA EM DESENVOLVIMENTO NO ESTADO DE SÃO PAULO

André de Oliveira SILVA
Engenheiro Civil - Agência de Águas do Estado de São Paulo - SP-Águas

Yuri Bertelli Correia LIMA
Engenheiro Civil - Agência de Águas do Estado de São Paulo - SP-Águas

Antônio CLAUDINO
Economista - Agência de Águas do Estado de São Paulo - SP-Águas

Noboru MINEI
Engenheiro Civil - Agência de Águas do Estado de São Paulo - SP-Águas

Amanda Vieira ANGELO
Tecnóloga Hidráulica e Saneamento Ambiental - Agência de Águas do Estado de São Paulo - SP-Águas

RESUMO

O descomissionamento de barragens tem se consolidado como etapa relevante do ciclo de vida dessas estruturas, sobretudo diante do envelhecimento dos empreendimentos, da alteração dos usos originalmente previstos e da necessidade de mitigação de riscos relacionados à segurança estrutural, hidráulica e ambiental. Apesar desse contexto, observa-se, no cenário nacional, a ausência de diretrizes regulatórias consolidadas e harmonizadas entre os órgãos fiscalizadores quanto aos procedimentos, modalidades e critérios técnicos aplicáveis ao descomissionamento de barragens de acumulação de água, especialmente aquelas destinadas a múltiplos usos. No Estado de São Paulo, essa lacuna normativa motivou o desenvolvimento de proposta específica no âmbito de nova deliberação da SP-ÁGUAS, atualmente em elaboração, voltada à organização de conceitos, etapas administrativas e soluções técnicas para o descomissionamento seguro de barragens sob sua jurisdição. A proposta trata o descomissionamento como processo administrativo e técnico integrado, abrangendo desde a decisão de encerramento da operação até o acompanhamento pós-obra, com articulação entre o órgão fiscalizador e o licenciamento ambiental. O artigo apresenta os fundamentos dessa abordagem regulatória, destacando as modalidades propostas na remoção total, descaracterização por rebaixamento ou abertura de brechas e ressignificação da estrutura, bem como os critérios técnicos e institucionais adotados para assegurar a eliminação da reservação permanente, a estabilidade das estruturas remanescentes e a mitigação de impactos a jusante, contribuindo para o avanço do debate nacional sobre o tema.

ABSTRACT

The decommissioning of dams has become a relevant stage in the life cycle of these structures, especially given the aging of the projects, the change in the originally planned uses, and the need to mitigate risks related to structural, hydraulic, and environmental safety. Despite this context, in the national scenario, there is a lack of consolidated and harmonized regulatory guidelines among the supervisory bodies regarding the procedures, modalities, and technical criteria applicable to the decommissioning of water storage dams, especially those intended for multiple uses. In the State of São Paulo, this regulatory gap motivated the development of a specific proposal within the scope of a new SP-ÁGUAS resolution, currently under preparation, aimed at organizing concepts, administrative steps, and technical solutions for the safe decommissioning of dams under its jurisdiction. The proposal treats decommissioning as an integrated administrative and technical process, encompassing everything from the decision to cease operations to post-construction monitoring, with coordination between the supervisory body and environmental licensing. The article presents the fundamentals of this regulatory approach, highlighting the proposed methods for total removal, decharacterization through lowering or opening of gaps, and re-signification of the structure, as well as the technical and institutional criteria adopted to ensure the elimination of the permanent reservoir, the stability of the remaining structures, and the mitigation of downstream impacts, contributing to the advancement of the national debate on the subject.

1. INTRODUÇÃO

O descomissionamento de barragens vem ganhando relevância no contexto da gestão da segurança dessas estruturas, particularmente em função do envelhecimento dos empreendimentos, da alteração de seus usos originais e da necessidade de redução de riscos associados à sua permanência em operação ou abandono. Nesse cenário, a etapa de desativação passa a demandar abordagens estruturadas, capazes de garantir a segurança hidráulica, geotécnica e ambiental das áreas potencialmente afetadas.

No Brasil, embora a Política Nacional de Segurança de Barragens tenha estabelecido diretrizes importantes para a gestão dessas estruturas, observa-se que o enfoque regulatório permanece predominantemente voltado às fases de implantação e operação, havendo limitada sistematização de procedimentos aplicáveis ao descomissionamento [1][2]. Essa lacuna normativa resulta em abordagens heterogêneas entre os órgãos fiscalizadores e dificulta a adoção de critérios técnicos uniformes, especialmente no caso de barragens de acumulação de água destinadas a usos múltiplos [5].

Diferentemente das barragens de mineração, que apresentam avanços regulatórios mais consolidados quanto à descaracterização, as barragens de usos múltiplos ainda carecem de diretrizes específicas que orientem tanto os empreendedores quanto os órgãos responsáveis pela análise e fiscalização dos processos de descomissionamento [6]. Essa ausência de padronização compromete a previsibilidade dos procedimentos e pode impactar a segurança das intervenções.

No Estado de São Paulo, esse contexto motivou o desenvolvimento de uma proposta normativa no âmbito da SP-ÁGUAS, voltada à estruturação do descomissionamento como um processo administrativo e técnico integrado. Essa abordagem busca organizar conceitos, definir modalidades de intervenção e estabelecer critérios técnicos e institucionais que assegurem a eliminação da reservação permanente, a estabilidade das estruturas remanescentes e a mitigação de impactos a jusante.

Assim, o presente artigo tem como objetivo apresentar os fundamentos dessa proposta regulatória, destacando sua estrutura, suas modalidades de descomissionamento e os critérios adotados, contribuindo para o avanço do debate técnico e institucional sobre o tema no contexto nacional.

As barragens de acumulação de água desempenham papel estratégico na gestão de recursos hídricos, atendendo a múltiplos usos, como abastecimento, irrigação, controle de cheias e atividades recreativas. Contudo, ao longo do tempo, parte dessas estruturas perde sua função original ou passa a representar riscos associados ao envelhecimento, à ausência de manutenção adequada ou à inadequação aos padrões atuais de segurança.

Diante desse cenário, o descomissionamento de barragens emerge como uma alternativa técnica e institucional relevante, possibilitando não apenas a eliminação de riscos, mas também a readequação do território às condições atuais de uso e ocupação.

No Brasil, a política de segurança de barragens avançou significativamente nas últimas décadas, especialmente com a implementação de instrumentos voltados ao

cadastro, à classificação e à fiscalização dessas estruturas. Entretanto, o arcabouço regulatório permanece predominantemente voltado à operação segura das estruturas, apresentando lacunas relevantes no que se refere ao encerramento da vida útil das barragens.

A ausência de normatização clara para o descomissionamento contrasta com a crescente necessidade de desativação de estruturas obsoletas ou que apresentam risco. Atualmente, a tomada de decisão sobre descomissionamento frequentemente ocorre de forma ad hoc, sem padronização, carecendo de critérios técnicos e administrativos uniformes.

Essa lacuna se torna mais crítica quando se consideram aspectos como gestão de sedimentos, impactos a jusante, recomposição ambiental e responsabilidades institucionais, os quais demandam abordagens estruturadas e multidisciplinares.

O presente artigo tem como objetivo apresentar a proposta regulatória em desenvolvimento no Estado de São Paulo, destacando seus fundamentos conceituais, etapas administrativas, modalidades técnicas e critérios adotados, com vistas a contribuir para a consolidação do tema no cenário nacional.

1. REFERENCIAL TEÓRICO E REGULATÓRIO

2.1 Descomissionamento no ciclo de vida das barragens

O ciclo de vida de uma barragem compreende as etapas de planejamento, projeto, construção, operação e desativação. Tradicionalmente, maior atenção é conferida às fases iniciais, entretanto, a fase de descomissionamento tem adquirido crescente relevância em função do aumento do número de estruturas envelhecidas ou inativas [7][8].

O descomissionamento consiste no conjunto de ações destinadas ao encerramento seguro da operação, podendo incluir a descaracterização da estrutura. Mesmo inativas, as barragens permanecem sujeitas a processos de degradação e instabilidade, o que reforça a necessidade de intervenções controladas [6][11].

2.2 Estrutura do processo

A Política Nacional de Segurança de Barragens estabelece diretrizes para gestão da segurança, mas não detalha procedimentos específicos para descomissionamento [1][2]. Normas técnicas nacionais também não tratam de forma sistemática essa etapa, concentrando-se em projeto e operação [5].

Essa lacuna normativa resulta em abordagens heterogêneas entre órgãos fiscalizadores, gerando insegurança técnica e jurídica [7].

2.3 Abordagens técnicas e experiências

Diversas metodologias podem ser aplicadas, incluindo:

- remoção total do maciço;

- rebaixamento do reservatório;
- abertura de brechas.

A escolha depende das condições geotécnicas, hidráulicas e ambientais [6][9]. Diretrizes internacionais indicam que o descomissionamento deve ser conduzido de forma gradual e monitorada, visando minimizar riscos e impactos ambientais [8][12].

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada baseou-se na elaboração de uma proposta regulatória estruturada, fundamentada em três etapas principais.

Inicialmente, foi realizada análise do arcabouço legal vigente, incluindo legislação federal e estadual [1][2][3][4]. Em seguida, procedeu-se à sistematização de conceitos técnicos e definição de diretrizes operacionais, com base em literatura técnica e estudos de caso [6][7][8].

Por fim, foi realizada a integração da proposta com instrumentos institucionais, especialmente no que se refere ao licenciamento ambiental e à atuação do órgão fiscalizador [4].

3. RESULTADOS: PROPOSTA REGULATÓRIA PARA DESCOMISSIONAMENTO

4.1 Estrutura do Processo de Descomissionamento (ProcDB)

A proposta normativa em desenvolvimento no âmbito da Agência de Águas do Estado de São Paulo - SP-ÁGUAS estrutura o descomissionamento de barragens como um processo administrativo e técnico formalizado, denominado Processo de Descomissionamento de Barragem (ProcDB). Essa abordagem representa um avanço relevante ao reconhecer o descomissionamento como uma etapa completa do ciclo de vida da barragem, e não apenas como uma intervenção pontual.

O ProcDB abrange todas as fases do encerramento da estrutura, desde a decisão inicial até o acompanhamento pós-obra, incluindo planejamento, articulação institucional, licenciamento ambiental, elaboração de projetos e execução das intervenções. Trata-se, portanto, de um modelo integrado que busca garantir rastreabilidade, controle regulatório e segurança em todas as etapas do processo.

Essa abordagem amplia o conceito tradicional, incorporando:

- Planejamento técnico
- Licenciamento ambiental
- Comunicação institucional
- Monitoramento pós-intervenção

Essa abordagem está alinhada às boas práticas internacionais de gestão do ciclo de vida de barragens [8][9].

4.2 Modalidades de Descomissionamento

Um dos principais avanços da proposta reside na definição clara de modalidades de descomissionamento, com critérios técnicos associados. A escolha da modalidade depende de fatores como características da barragem, condições ambientais, riscos associados e viabilidade técnica e econômica. A proposta estabelece três modalidades principais:

4.2.1 Desfazimento da barragem

Consiste na remoção integral do barramento e das estruturas associadas, com destinação adequada dos materiais. Trata-se da solução que mais se aproxima da restituição das condições naturais do curso d'água, sendo, em geral, a alternativa de maior intervenção física e custo (Figura 1).



Figura 1 - Remoção total de uma barragem (Fonte: Sustentabilidade no Ar, 2026)

4.2.2 Descaracterização da barragem

Caracteriza-se pela eliminação da função de barramento sem necessariamente remover toda a estrutura. Envolve intervenções como rebaixamento da crista ou abertura de brechas (Figura 2), remoção de dispositivos de controle hidráulico e implantação de sistemas de drenagem e estabilização geotécnica.

Essa modalidade é particularmente relevante em cenários com elevado volume de sedimentos acumulados, nos quais a remoção total pode implicar riscos ambientais ou custos excessivos (Figura 3).

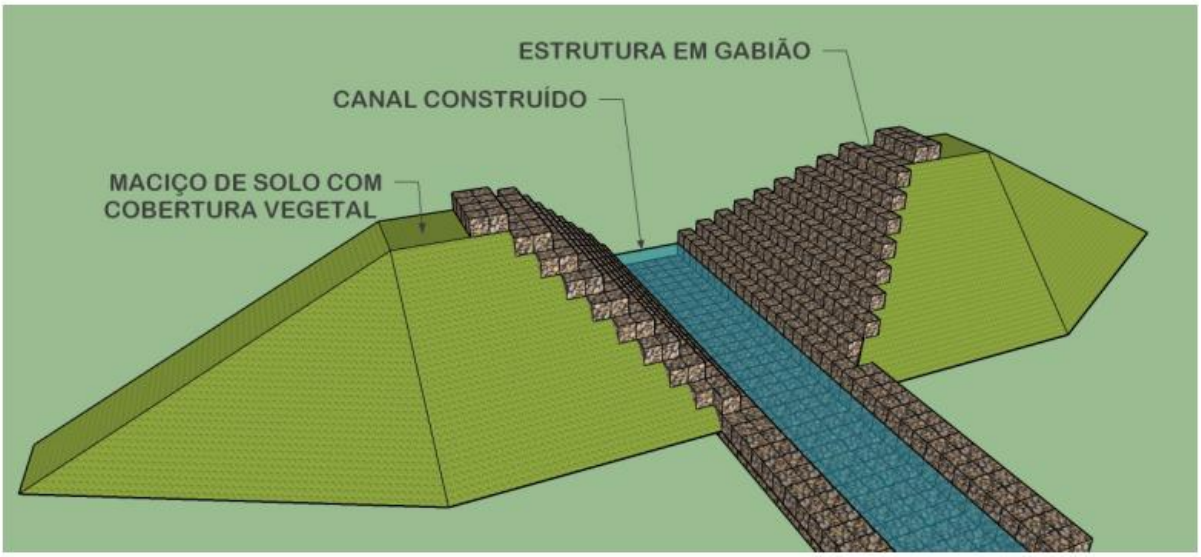


Figura 2 - - Esquematização de abertura de brecha (Fonte: Estudo de Caso: Descomissionamento e descaracterização de barragens de água para fins de acumulação - Cobranseg, 2020)



Figura 3 - Antes e depois da descaracterização da barragem B8, da Vale (Fonte: Agência Minas, 2024)

Além disso, a proposta normativa avança ao detalhar não apenas as modalidades conceituais, mas também as tipologias executivas de intervenção permitindo adaptação às condições locais [6]. Destacam-se:

- descaracterização por rebaixamento até a cota média do assoreamento;
- abertura de brecha de profundidade total (DBT);
- abertura de brecha de profundidade parcial (DBP);
- conversão em estrutura de retenção temporária de cheias (“piscinão in-line”).

Esse detalhamento reduz ambiguidades e contribui para maior padronização técnica entre projetos.

A definição combinada entre modalidades conceituais e tipologias executivas representa inovação relevante, ao reduzir ambiguidades interpretativas e promover maior uniformidade na elaboração de projetos de descomissionamento.

4.2.3 Ressignificação da barragem

Refere-se à conversão funcional da estrutura, com eliminação da reservação permanente e adaptação do barramento para novos usos, como aterro de travessia ou estrutura de retenção temporária de cheias.

Essa abordagem incorpora soluções baseadas em adaptação de infraestrutura existente, permitindo ganhos em eficiência econômica e funcionalidade territorial, especialmente em contextos urbanos ou periurbanos.

4.3 Estrutura Administrativa

O Processo de Descomissionamento de Barragens (ProcDB) é composto por cinco etapas principais:

Tabela 1 – Etapas

Etapa	**Descrição**
Planejamento	Elaboração do Pré-Projeto de Descomissionamento (PréDB)
Licenciamento	Autorização ambiental
Projeto	Desenvolvimento do projeto executivo (PeExDB)
Execução	Execução e monitoramento
Pós-obra	Relatório de conclusão

Essa estrutura assegura continuidade na gestão e maior controle institucional ao longo de todo o processo [4].

4.4 Governança e Responsabilidades

O descomissionamento envolve múltiplos atores e interfaces institucionais, destacando-se:

- Órgãos fiscalizadores de segurança de barragens
- Órgãos ambientais responsáveis pelo licenciamento
- Empreendedores e responsáveis legais pelas estruturas

A falta de integração entre essas esferas pode comprometer a efetividade das ações, tornando necessário o estabelecimento de diretrizes claras e coordenadas

A proposta estabelece divisão clara de competências:

Tabela 2 -Competências

Instituição	**Função**
Empreendedor	Decisão e execução do descomissionamento
SP-ÁGUAS	Fiscalização, análise técnica, acompanhamento e recadastramento
Órgãos ambiental	Licenciamento ambiental

Além disso, prevê-se:

- Possibilidade de descomissionamento compulsório em situações de risco
- Recadastramento da estrutura remanescente conforme sua nova condição

4. DISCUSSÃO

A proposta apresenta avanços significativos em relação ao cenário nacional suprindo lacunas normativas existentes no Brasil [1][5]. Destacando-se:

- Estruturação do descomissionamento como processo completo
- Padronização de modalidades técnicas
- Integração entre segurança e meio ambiente
- Inclusão do conceito de ressignificação
- Previsão de monitoramento pós-descomissionamento

Esse equilíbrio entre iniciativa privada e poder regulatório reforça o papel do Estado na gestão de riscos associados a barragens. Além disso, a possibilidade de ressignificação amplia o leque de soluções, incorporando abordagens mais flexíveis e adaptativas.

Reforçando o papel do órgão fiscalizador na coordenação do processo, estabelecendo responsabilidades claras para o empreendedor e promovendo a integração entre as esferas técnica e ambiental.

5. CONCLUSÕES

O descomissionamento de barragens representa um desafio emergente na gestão de segurança dessas estruturas no Brasil.

A proposta desenvolvida no Estado de São Paulo constitui uma iniciativa pioneira ao estruturar o descomissionamento como processo integrado, com definição clara de modalidades, critérios técnicos e responsabilidades institucionais.

A sistematização do processo, a definição de modalidades e a integração institucional contribuem para a redução de riscos e para o aprimoramento da governança no setor.

Por fim, sua implementação poderá servir como referência para outras unidades da federação, promovendo a harmonização de práticas e o fortalecimento da política de segurança hídrica e estrutural de barragens no Brasil [1][8].

6. PALAVRAS-CHAVE

Descomissionamento de barragens; segurança de barragens; regulação; descaracterização; ressignificação; SP-Águas

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BRASIL (2010) – "Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 – Política Nacional de Segurança de Barragens", Diário Oficial da União, Brasília, Brasil.

[2] BRASIL (2020) – "Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 – Atualização da Política Nacional de Segurança de Barragens", Diário Oficial da União, Brasília, Brasil.

[3] SÃO PAULO (Estado) (1991) – "Lei nº 7.663, de 30 de dezembro de 1991 – Política Estadual de Recursos Hídricos", Diário Oficial do Estado, São Paulo, Brasil.

[4] SÃO PAULO (Estado) (2020) – "Resolução SIMA nº 86/2020 – Licenciamento ambiental de barragens", Diário Oficial do Estado, São Paulo, Brasil.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2017) – "NBR 13.028: Projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água", norma técnica, Rio de Janeiro, Brasil.

[6] FERNANDES, R. B.; SILVA, L. S. M.; SIEIRA, A. C. F. (2020) – "Descomissionamento e descaracterização de barragens de água para fins de acumulação", XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Campinas, Brasil.

[7] COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB) (2016) – "Diretrizes para segurança de barragens", publicação técnica, Rio de Janeiro, Brasil.

[8] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD) (2021) – "Dam Removal and Decommissioning", Bulletin 182, Paris, França.

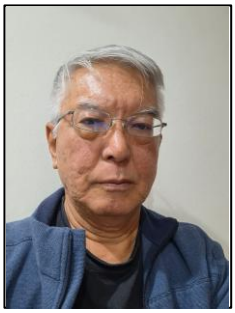
[9] UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (USBR) (2015) – “Best Practices for Dam Decommissioning”, publicação técnica, Denver, Estados Unidos.

[10] FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA) (2013) – “Federal Guidelines for Dam Safety”, publicação técnica, Washington, Estados Unidos.

[11] JOPPERT JUNIOR, I. (2007) – “Fundações e contenções de barragens”, livro técnico, São Paulo, Brasil.

[12] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) (2010) – “Environmental Management of Dams”, publicação técnica, Nairobi, Quênia.

	**André de Oliveira SILVA** Engenheiro Civil (Toledo Prudente Centro Universitário). Tecnólogo em Saneamento Ambiental (UNOESTE). Especialista em Segurança de Barragens (UFBA). Engenheiro SP-ÁGUAS, atuando como Gerente de Segurança de Barragens na Superintendência de Fiscalização.
	**Yuri Bertelli Correia LIMA** Engenheiro Civil (Oswaldo Cruz-SP). Engenheiro Ambiental (Oswaldo Cruz-SP). Cursando Especialização em Segurança de Barragens (IPT-SP). Engenheiro SP-ÁGUAS, atuando na divisão de Segurança de Barragem.
	**Antônio CLAUDINO** Tecnólogo em Obras Hidráulicas (FATEC) e Economista (FEA-USP), possui pós-graduações em Engenharia Hidráulica (EPUSP), Direito Ambiental e Gestão de C&T pela USP. Atuou por 47 anos no CTH em estudos de rios e barragens, utilizando modelos físicos reduzidos e matemáticos. Desde 2017, trabalha na fiscalização de segurança de barragens junto ao CTH e à Diretoria de Bacia do DAEE.

	**Noboru MINEI** Engenheiro civil, mestre e doutor pela Escola Politécnica da USP. Entrou no DAEE, na Diretoria do CTH, 1979, onde trabalhou nas áreas de Hidrologia e Hidráulica. Foi diretor da Divisão de Hidrologia e do CTH. Montou o Grupo Técnico de Segurança de Barragens no CTH. Juntamente com técnicos do IPT, montou o Curso de Especialização em Segurança de Barragens, em 2017.
	**Amanda Vieira ANGELO** Tecnóloga em Hidráulica e Saneamento Ambiental (Fatec - SP, 2021), Gestora Ambiental (UMESP, 2018) e graduanda em Engenharia Civil (UNESA). Atua como Chefe de Divisão de Gestão de Segurança de Barragens da Agência de Águas do Estado de São Paulo - SP-Águas. Desempenhou funções de assessoria a diretoria de planejamento de recursos hídricos no então antigo DAEE.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

FERRAMENTAS ESTRATÉGICAS DE COMUNICAÇÃO PARA INFORME DA VARIAÇÃO DE VAZÃO DEFLUENTE ÀS POPULAÇÕES A JUSANTE DA UHE BELO MONTE

Gustavo SILVA
Coordenador de Relacionamento com Comunidades - Norte Energia S.A.
Tássia ESTEVÃO
Analista Socioambiental Pleno – Norte Energia S.A.
Christian MENDES
Analista Socioambiental Pleno – Norte Energia S.A.
Bruno BAHIANA
Superintendente Socioambiental e do Componente Indígena – Norte Energia S.A.
Renan GIL
Gerente de Socioeconomia – Norte Energia S.A.

RESUMO

O trabalho tem como objetivo apresentar metodologia para informar as comunidades não indígenas e indígenas localizadas no Trecho de Vazão Reduzida (TVR) da UHE Belo Monte, sobre a variação da vazão defluente da operação. O empreendimento apresenta características únicas no setor, especialmente em função da formação do TVR com cerca de 100 km de extensão, compreendendo parte da Volta Grande do Xingu (VGX), onde o escoamento superficial do rio é diretamente influenciado pelas condições operacionais da Usina. A Outorga nº 1522/2024, emitida pela ANA determina condições especificas relacionadas a vazão defluente para o TVR, dentre elas, destaca-se a taxa de variação da defluência média diária do reservatório do rio Xingu na UHE Pimental no período úmido do ano. Neste sentido, o Outorgado deverá incorporar as alterações na operação ao seu plano de comunicação, garantindo ampla publicidade de seus efeitos junto aos usuários localizados na VGX. A comunicação junto as populações constituem elemento estratégico para a segurança de cerca de 2000 famílias, com ampla relação social vinculada aos usos do rio. Ao se identificar tendências de alterações superior ao previsto, a integração de ferramentas de comunicação como fórum e ciclo de reuniões comunitárias desempenham funções essenciais para a população compreender o recebimento das informações específicas transmitidas de forma instantânea por mecanismos complementares com a RedePop Norte Energia, emissoras de rádio e sistema de radiofonia.

ABSTRACT

This study presents a methodology for informing Indigenous and non-Indigenous communities located in the Reduced Flow Stretch (RFS) of the Belo Monte Hydroelectric Power Plant about variations in discharged flow resulting from plant operations. The project has unique characteristics in the energy sector due to the creation of the RFS, which extends for approximately 100 km along part of the Volta Grande do Xingu, where river flow conditions are directly influenced by hydropower operations. Water Permit No. 1522/2024, issued by the National Water and Basic Sanitation Agency, establishes operational conditions related to discharged flow in the RFS, especially regarding the variation rate of the average daily discharge from the Xingu river reservoir during the wet season. In response, the permit holder must incorporate operational changes into its communication strategy to ensure broad dissemination of impacts among local users. Communication with local populations is a strategic component for the safety of nearly 2,000 families whose livelihoods depend directly on the river. When flow variations beyond expected limits are identified, communication tools such as forums, and community meetings are activated to support public understanding. These actions are complemented by instant communication channels, including RedePop Norte Energia, local radio stations, and radiotelephony systems.

1. INTRODUÇÃO

Os empreendimentos hidrelétricos de grande porte impõem desafios igualmente importantes à gestão socioambiental, especialmente em localidades onde as comunidades dependem diretamente dos regimes naturais do rio para realização de suas atividades cotidianas. Nesse cenário, as variações da vazão decorrentes da operação de hidrelétricas podem impactar diretamente a mobilidade e a segurança das comunidades que possuem relação direta com os rios.

No complexo da UHE Belo Monte, a formação do Trecho de Vazão Reduzida (TVR) na Volta Grande do Xingu, constitui um cenário ímpar no setor elétrico brasileiro ao estabelecer uma condição hidrológica fortemente ligada à operação do empreendimento, ao longo de um trecho do rio Xingu de aproximadamente 100 quilômetros entres as Casas de Força Complementar e Principal, contendo aproximadamente duas (2) mil famílias residentes no território, entre populações não indígenas e indígenas.

A formação deste trecho amplia a necessidade de mecanismos eficazes de comunicação e interação social que permitem às comunidades a jusante da Casa de Força Completar (UHE Pimental) serem informadas da variação da vazão defluente, com vista à adaptação e prevenção de riscos frente a constituição da dinâmica hidrológica desde o início da operação da usina. Nesses contextos, conforme discutido por [1], a gestão do risco depende não apenas de parâmetros técnicos, mas da capacidade da comunicação de reduzir incertezas e orientar a ação dos públicos expostos. Assim, a comunicação das variações de vazão assume caráter estratégico, ao permitir que as comunidades compreendam, antecipem e se adaptem às mudanças operacionais que impactam diretamente seus modos de vida.

No campo normativo, dentre as diretrizes destinadas a operação do empreendimento, a Outorga nº 1522, de 24 de junho de 2024, emitida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), estabelece que o Outorgado, no caso a empresa concessionária Norte Energia S.A., deverá incorporar as alterações na operação do Complexo de Belo Monte ao seu plano de comunicação, garantindo ampla publicidade de seus efeitos junto aos usuários localizados na região da Volta Grande do Xingu. Nessa conjuntura, a comunicação deixa de ser apenas um instrumento informativo e passa a desempenhar papel estratégico na mitigação de riscos socioambientais, ao possibilitar maior previsibilidade e suporte à tomada de decisão pelas comunidades.

Este trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia, os resultados e as melhorias nas estratégias de comunicação utilizadas por meio de dinâmicas e ferramentas de interação social e comunicação que se complementam com vista a aplicar procedimentos adequadas a assegurar o fluxo contínuo de informações sobre as variações de vazão defluente no TVR. Essas ações são executadas pelo Programa de Interação Social e Comunicação (Item 7.2) do Projeto Básico Ambiental (PBA) da Usina Hidrelétrica (UHE) Belo Monte.

1.1 Contexto do complexo Hidrelétrica da UHE Belo Monte

A Usina Hidrelétrica de Belo Monte é a maior usina 100% brasileira, ou seja, um dos principais empreendimentos de geração de energia do Brasil e a 5ª maior do mundo, com capacidade instalada de 11.233,1 MW. A sua principal peculiaridade é o

funcionamento a fio d'água, diferente de outras usinas com grandes reservatórios. Belo Monte possui reservatórios (Xingu e Intermediário) de menor capacidade de armazenamento, ou seja, o complexo utiliza as vazões naturais do rio Xingu para geração de energia.

O Complexo Belo Monte (Figura 1) é composto pela Usina Hidrelétrica Belo Monte (Casa de Força Principal) com 18 Unidades Geradoras (UGs) de 611,11 MW; Usina Hidrelétrica Pimental (Casa de Força Complementar) sendo a barragem principal da Usina, com seis unidades geradoras de 38,85 MW, vertedouro com a capacidade para dissipar uma vazão de 62 mil m³/s por meio de 18 comportas; Reservatório Xingu com 359 km² de extensão; Canal de Derivação com 210 m de largura no fundo, 25 m de altura e aproximadamente 16,2 km de comprimento; e o Reservatório Intermediário, com 119 km² de extensão, formado e contido por diques e barramentos.

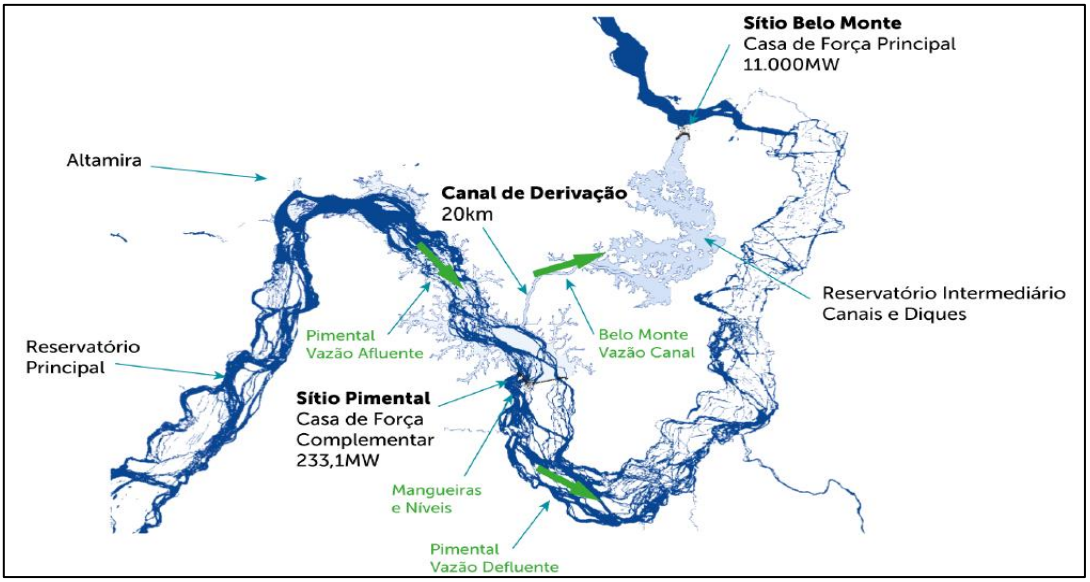


Figura 1 - Arranjo do Complexo da UHE Belo Monte.

Essa configuração operacional resulta na redistribuição das vazões, com implicações diretas para o Trecho de Vazão Reduzida (TVR) localizado a jusante do barramento principal. Por outro lado, esta solução de engenharia evitou o alagamento de comunidades ao longo da Volta Grande do Xingu, incluindo Terras Indígenas.

As características operacionais do empreendimento, ao redefinirem a dinâmica de escoamento do rio Xingu, não se limitam ao campo técnico, mas se desdobram diretamente sobre o território e as populações que dele dependem. Nesse sentido, essa nova configuração impôs novas condições que podem influenciar a mobilidade, as atividades produtivas e as práticas socioculturais das comunidades localizadas a jusante da UHE Pimental. Assim, a compreensão dos efeitos da operação da usina requer a análise das especificidades territoriais, bem como das características socioeconômicas e dos modos de vida das populações residentes no TVR nesse contexto.

Estudos sobre grandes projetos indicam que os conflitos socioambientais frequentemente emergem não apenas dos impactos materiais dos empreendimentos, mas da ausência de processos comunicacionais contínuos, transparentes e eficientes. As argumentações de [2] é que a insuficiência de informação e diálogo tende a intensificar percepções de risco e insegurança, reforçando a importância da

comunicação social como elemento estruturante da relação entre empreendimento e território.

1.1.1 Trecho de Vazão Reduzida (TVR)

O TVR da Usina Hidrelétrica Belo Monte abrange comunidades indígenas e não indígenas ao longo de 100 km das margens e ilhas do rio Xingu entre as Casas de Forças Complementar e Principal do complexo, inseridas nos municípios de Altamira, Vitória do Xingu, Senador José Porfírio e Anapu, ambos no estado do Pará. Estruturado com 28 (vinte e oito) comunidades classificadas entre áreas urbanas e rurais e 02 (duas) Terras Indígenas (Figura 2), o território apresenta elevada diversidade socioespacial, sendo fortemente condicionado pela relação das populações com o rio, que exerce papel central na mobilidade, na geração de renda e na organização das atividades cotidianas.

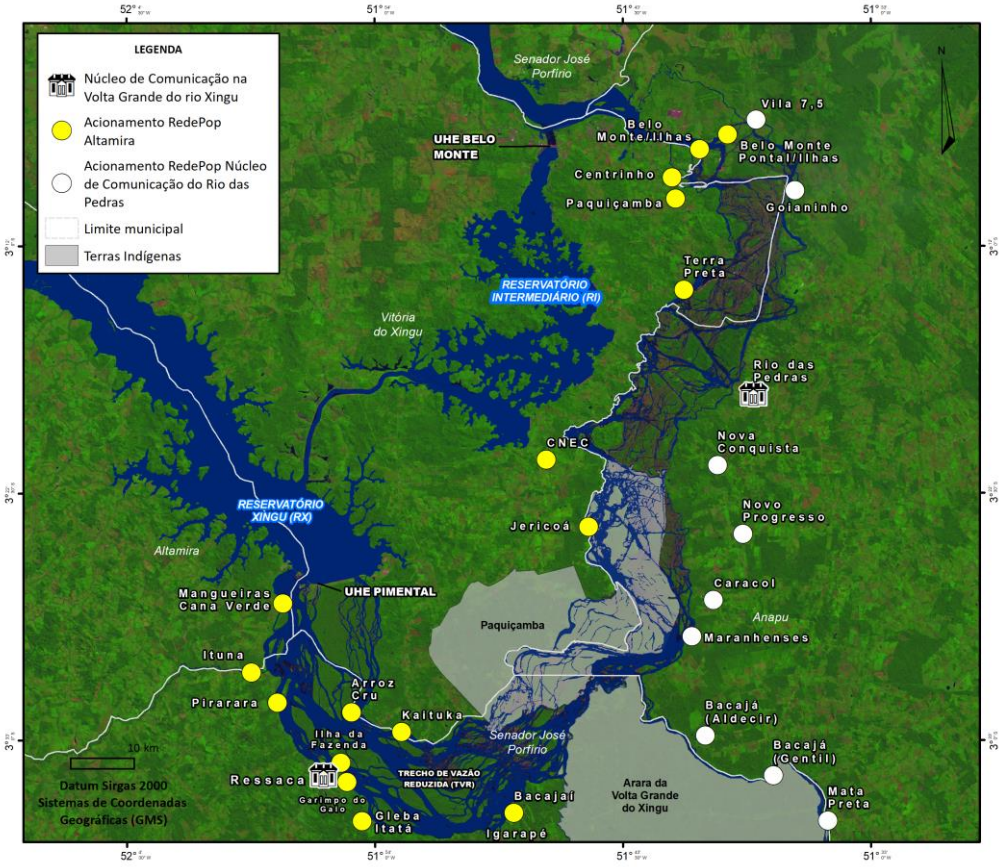


Figura 2 – Trecho de Vazão Reduzida (TVR).

O deslocamento fluvial constitui um dos principais meios de circulação, seja pela limitação do acesso terrestre em algumas comunidades ou pela preferência cultural do modal, sendo determinante para o acesso a serviços, o transporte de bens e a integração entre comunidades. Do ponto de vista socioeconômico, predominam atividades como a pesca, a agricultura de subsistência e práticas extrativistas, configurando um modo de vida diretamente dependente das dinâmicas hidrológicas do rio Xingu. Ainda no âmbito socioeconômico destaca-se que o TVR possui pouco ou nenhum sinal de telefonia, dificultando a comunicação com a população ali residente.

Nesse contexto, as variações de vazão combinadas com ausência de sinal de telefonia influenciam diretamente as condições de vida das populações residentes no território, impactando aspectos como mobilidade, segurança, planejamento das atividades produtivas e comunicação. O que reforça a necessidade de mecanismos que ampliem a previsibilidade das condições hidrológicas no território, por meio de estratégias de comunicação estruturada.

Para a comunicação Social, a previsibilidade constitui fator central na redução de vulnerabilidade socioambiental. Conforme destaca [3], o acesso qualificado à informação permite que populações organizem suas práticas cotidianas e reduzam a exposição a situação de risco. Assim, a comunicação estruturada sobre a variação da vazão configura-se como instrumento de apoio à adaptação das comunidades às novas dinâmicas hidrológicas do território.

2. FERRAMENTAS E DINÂMICAS DE INTERAÇÃO SOCIAL E COMUNICAÇÃO PARA INFORMAR A VARIAÇÃO DA VAZÃO NO TVR DA UHE BELO MONTE

O Programa de Interação Social e Comunicação tem em seu objetivo a construção de estratégias de comunicação com a comunidade, constituindo parcerias e negociação em busca de consenso entre os diversos públicos envolvidos na implantação e operação da UHE Belo Monte. Assim, tanto na fase de implantação quanto na atual fase de operação, o Programa desenvolve ações por meio de dinâmicas e ferramentas de interação social e comunicação que se complementam, com vista a aplicar metodologias adequadas à participação social, assegurar o fluxo contínuo de informações, além de oferecer apoio aos demais Planos, Programas e Projetos do PBA. No âmbito do licenciamento ambiental brasileiro, a Comunicação Social é reconhecida como instrumento fundamental para assegurar o direito à informação e fortalecer a participação social. O [4] destaca que os Programas de Comunicação Social devem integrar a gestão permanente dos empreendimentos, especialmente na fase de operação, contribuindo com a transparência, o diálogo e a mitigação de conflitos socioambientais. Para alcançar seus objetivos, o Programa mantém e operacionaliza os seguintes mecanismos de comunicação e interação social:

- A RedePop Norte Energia, formada por moradores das localidades do entorno da Usina, que participam de forma voluntária e autorizam o recebimento de informações, via aplicativo de mensagens WhatsApp Business, sobre a operação da Usina e assuntos socioambientais. O canal tem as funções de enviar materiais de comunicação, a partir de conteúdos padronizados (cartões digitais com legenda e áudios), realizar mobilizações e acolher e responder os questionamentos da população;
- Os Ciclos de reuniões comunitárias na Volta Grande do Xingu, realizados durante os períodos de cheia e seca do rio, atendendo comunidades urbanas e rurais do TVR, com o objetivo de apresentar à população os principais resultados, atualizações e o andamento das ações de mitigação e de monitoramento socioambiental relacionadas à UHE Belo Monte, proporcionando a escuta, diálogo e o retorno com informações qualificadas sobre cada tema;

- O Fórum de Acompanhamento Social de Belo Monte (FASBM), órgão colegiado autônomo e de caráter consultivo, cujo objetivo é garantir um espaço de interlocução e diálogo entre a Norte Energia e a sociedade civil da Área de Influência Direta (AID) da UHE Belo Monte, representada por órgãos públicos, instituições de ensino e pesquisa, bem como demais entidades da sociedade civil organizada, no acompanhamento, discussão e no desenvolvimento das ações do PBA. Atualmente o Fórum é constituído por 01 (um) Colegiado e 03 (três) Comissões, sendo estas: (i) Comissão das Comunidades dos Reservatórios, TVR e da Biodiversidade - CCRTBio; (ii) Comissão da Pesca Artesanal, Ornamental e Aquicultura - CPAOA e (iii) Comissão da Volta Grande do Xingu - CVGX;
- Os Núcleos de Comunicação na Volta Grande do Xingu (VGX), constituem espaços físicos da empresa Norte Energia, localizados nas comunidades da Vila da Ressaca e no Rio das Pedras no TVR. Funcionando como pontos presenciais de escuta ativa, acolhimento de demandas, difusão de informações, disponibilização de acesso à internet, salas de leitura e informática, além do apoio para a realização de reuniões, oficinas e cursos efetivados por empresas que executam as ações do PBA ou pela própria Norte Energia, bem como por outras instituições, associações, cooperativas e comunitários que solicitam a disponibilização das estruturas para atividades locais.

As emissoras de rádio, com alcance regional, também são utilizadas pela UHE Belo Monte para informar as comunidades do TVR e da região sobre as ações da usina.

Outra ferramenta de comunicação específica utilizada pela usina é o Sistema de Radiofonia Indígena da UHE Belo Monte, com registro, acompanhamento de demandas e envio de Comunicados Institucionais. O sistema também presta apoio na comunicação entre aldeias e órgãos indigenistas e é executado por meio do Projeto Básico Ambiental – Componente Indígena (PBA-CI).

2.1 Metodologia de informe da variação de vazão defluente

A informação da variação da vazão defluente da UHE Belo Monte é realizada desde o início da operação da Usina, ocorrendo de maneiras distintas e complementares. Os informes prévios são enviados por meio da RedePop Norte Energia, em emissoras de rádio, no Sistema de Radiofonia indígena e fixados nos Núcleos de Comunicação da Volta Grande do Xingu. As orientações gerais sobre os procedimentos e regras operativas que promovem a redução da vazão no TVR são apresentadas em ciclos de reuniões comunitárias no TVR e nas reuniões do Fórum de Acompanhamento Social de Belo Monte (FASBM).

Em relação aos informes prévios, a partir de instrução específica de comunicação das variações de vazão, estabeleceu-se um fluxo de decisão para comunicar os moradores da Volta Grande do Xingu, quando as taxas de variações diárias de vazão são superiores a 4%, seja para mais (“subida de nível”) ou para menos (“redução de nível”), no Trecho de Vazão Reduzida (TVR) da UHE Belo Monte, em atenção a Outorga nº 1522, de 24 de junho de 2024. Cabendo ressaltar que as variações na vazão defluente podem ocorrer em função das flutuações naturais de afluência no

período chuvoso; despachos na geração de energia junto ao Operador Nacional do Sistema (ONS); e interrupções no Sistema Interligado Nacional (SIN).

A estrutura do sistema de comunicação voltado à disseminação de informações prévias sobre a variação da vazão defluente no TVR tem origem nos dados hidrológicos do monitoramento contínuo e das definições de operação do Complexo Belo Monte. Os dados são analisados e convertidos em informações compreensíveis, considerando parâmetros como tendência de variação, magnitude esperada e possíveis implicações práticas no uso do rio.

Quanto as orientações gerais que ocorrem em reuniões comunitárias e fóruns, os encontros têm o objetivo de realizar interação direta para esclarecer sobre possível redução da vazão no TVR frente à operação da UHE Belo Monte, destacando influência nas alterações internas ou externas que provocam oscilação na vazão defluente. Sendo uma pauta bastante discutida nos primeiros anos da operação e/ou quando se identifica a necessidade de fazer novas explanações sobre o assunto, seja por melhorias na operação que ocasionam redução na oscilação da vazão defluente ou pela necessidade de atender recomendações específicas do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) relacionadas aos cuidados com a vazão defluente.

Do ponto de vista da governança territorial, a comunicação permanente entre o empreendimento e comunidades amplia a capacidade de gestão de territórios impactados por grandes projetos. Conforme destacado por [5] a circulação contínua de informações relevantes fortalece a confiança institucional e contribui para redução de conflitos, especialmente em contextos marcados por assimetrias de poder e informação.

A estratégia de comunicação redundante combina diferentes ferramentas de comunicação e interação social, para ampliar o alcance e garantir maior confiabilidade na transmissão da informação junto às comunidades ribeirinhas e indígenas.

3. RESULTADOS

Desde o início da operação da UHE Belo Monte, que passou a controlar a vazão defluente para o TVR, a empresa Norte Energia utiliza estratégias de comunicação e interação social com o objetivo de manter a população do entorno da Usina, especialmente os moradores do TVR, informada sobre as alterações das vazões. Cabe destacar que os mecanismos de comunicação são aperfeiçoados rotineiramente, acompanhando a dinâmica do território e os avanços da tecnologia.

Dentre as ferramentas de comunicação, os spots em rádios vêm sendo usados para informar as comunidades sobre a variação da vazão no TVR, por meio da utilização de emissoras de rádio com alcance regional. No período analisado (2016 a 2025), foram realizadas 3.419 inserções de anúncios sobre o tema.

A Figura 3 demonstra que no ano de 2016, o envio de spots foi expressivo, ocasionado pela formação do Trecho de Vazão Reduzida e consequentemente pelo início da operação da Usina. Em 2021, houve um leve incremento nos informes, logo após o início da operação a plena capacidade de geração da UHE Belo Monte, demandando intensificação na comunicação.

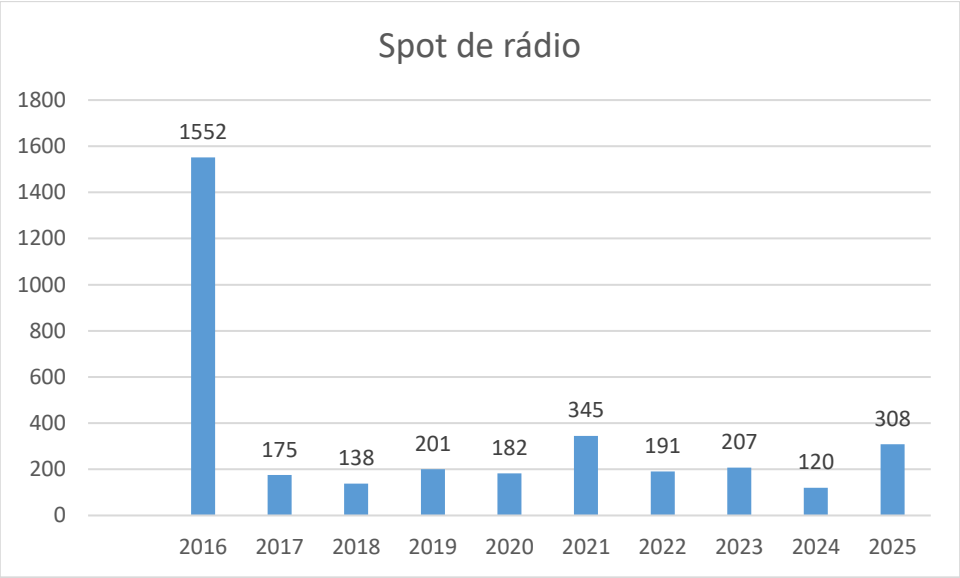


Figura 3 – Informes de vazão veiculados em rádios.

Em relação a RedePop, desde sua consolidação em 2020, quando era denominada Rede de Comunicação Popular, o canal envia informações sobre a variação da vazão do rio aos moradores do TVR, com o objetivo de orientar a população a respeito dos cuidados com as embarcações, pertences, casas ou animais à beira do rio.

A partir de 2024 o canal de comunicação foi reestruturado e fortalecido, passando a ser chamado de RedePop Norte Energia, com a utilização da persona “Bela” (Figura 4), para tornar a comunicação mais próxima, amigável e interativa, com o emprego de linguagem e recursos de conversação cotidianos, tornando a comunicação mais leve, com a finalidade de despertar o interesse do usuário, combinando imagens, textos e áudios, visando garantir acessibilidade e integridade das informações, principalmente para o público-alvo não alfabetizado.



Figura 4 – RedePop Norte Energia – Avatar Bela.

Conforme a Figura 5, desde a sua utilização, o canal de comunicação enviou 43.679 informes com orientações sobre a variação da vazão defluente. O aumento significativo ocorreu em 2021 a partir da operação em plena capacidade de geração do empreendimento.

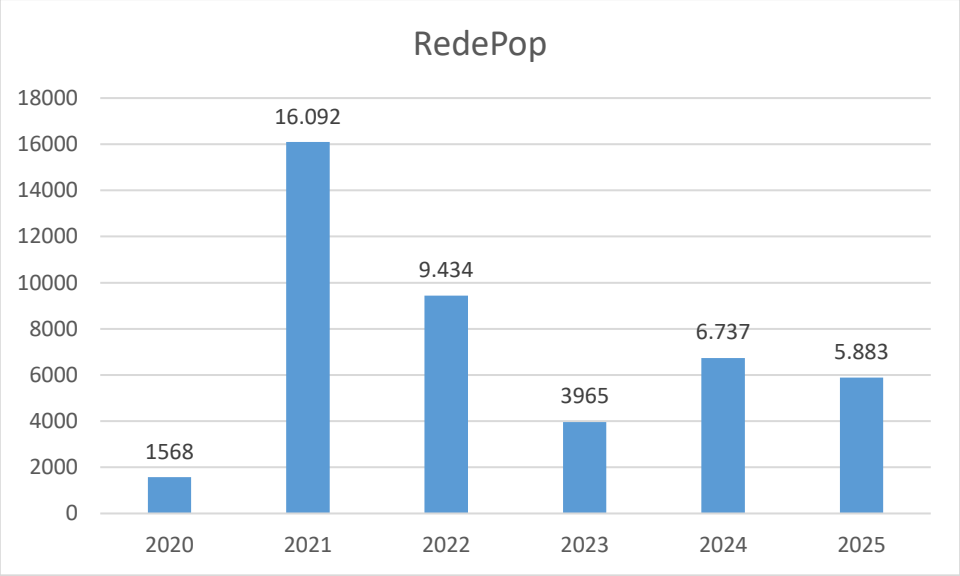


Figura 5 – Envio de informes de vazão pela RedePop Norte Energia.

A Figura 6 demonstra o formato do Cartão Digital (Card) do informe de vazão, já a Figura 7, apresenta o modo como a informação enviada é recepcionada pelo público no aplicativo de mensagens. As pessoas que recebem o comunicado composto por Card, legenda e áudio, passam a incorporar a informação às suas atividades rotineiras de modo a reduzir a exposição a situações de risco associadas à variação da vazão.



Figura 6 - Card do informe de vazão.



Figura 7 – Recepção do informe.

Do ponto de vista funcional, vale destacar que, como o TVR não possui sinal telefônico ou, quando existente, o sinal telefônico é limitado, para que as mensagens chegassem ao público-alvo, a Norte Energia executou a instalação de 129 (cento e vinte e nove) antenas de internet satelital no TVR (Figura 8), distribuídas em 28 comunidades ribeirinhas não indígenas e nas Terras Indígenas Paquiçamba e Arara da Volta Grande.

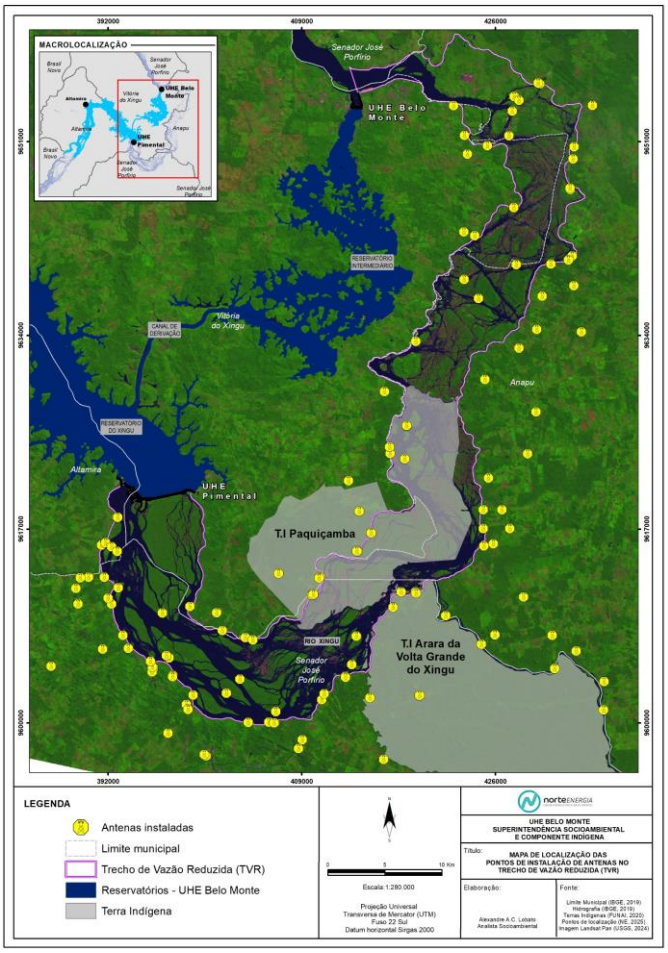


Figura 8 – Espacialização das antenas de internet satelital instaladas no TVR.

Nos Núcleos de Comunicação localizados no TVR, desde suas instalações nos anos de 2017 e 2021, as informações dos boletins de Vazões e Níveis do Rio Xingu (Figura 9) disponibilizados no site da Norte Energia são replicadas nos quadros de vazões (Figuras 10 e 11) dos espaços destinados à interação social, à divulgação de informação e o diálogo entre a Norte Energia e as partes interessadas locais.



Vazões e Níveis do Rio Xingu

Acompanhe a previsão das condições hidrológicas do rio Xingu na área de influência direta da UHE Belo Monte.

Atualização

sexta-feira, 10 de abril de 2026

09/04/2026 13/04/2026

Resumo

dia	09/04/26	10/04/26	11/04/26	12/04/26	13/04/26
Descrição	Registrado	Previsto	Previsto	Previsto	Previsto
a) Belo Monte - Vazão Defluente (m³/s)	9357	9681	7723	6716	9889
b) Belo Monte - Vazão do Canal (m³/s)	9357	9681	7723	6716	9889
c) Pimental - Vazão Afluente (m³/s)	18082	17897	17820	17740	17640
d) Pimental - Vazão Defluente (m³/s)	9580	9398	9081	8809	8544
e) Pimental - Nível Montante (m)	95,84	95,60	95,79	96,25	96,09
f) Pimental - Nível Mangueiras (m)	85,61	85,53	85,45	85,38	85,31

Observação

- **Pimental - Nível Montante** é o nível obtido na base antes da barragem, no lado do reservatório.
- **Pimental - Nível Jusante** é o nível da água obtido na estação de medição Mangueiras.
- **Pimental - Vazão Afluente** é o fluxo de água que está chegando na base de montante da Usina. A Vazão Afluente da Usina Pimental é a mesma vazão do Rio Xingu.
- **Pimental - Vazão Defluente** é o fluxo total de água que sai da Usina e vai para a jusante da barragem, região da Volta Grande do Xingu. É representada pela soma das vazões vertidas e turbinadas em Pimental com a vazão destinada ao STP, esta vazão é totalmente destinada ao Trecho de Vazão Reduzida (TVR – na Volta Grande do Xingu).
- **Belo Monte - Vazão Canal** é o fluxo de água que passa pelo canal que alimenta o reservatório de Belo Monte.
- **Belo Monte - Vazão Defluente** é o fluxo de água que passa pela usina de Belo Monte e é igual a que passa pelas turbinas das Unidades Geradoras.

Figura 9 – Boletim de Vazões e Níveis do Rio Xingu.



Figura 10 – Quadro de Vazões – Núcleo Vila da Ressaca.



Figura 11 – Quadro de Vazões – Núcleo Rio das Pedras.

Em relação a comunicação destinada aos povos indígenas da Volta Grande do Xingu, desde o início da operação da usina, registra-se o envio de 26.972 informes sobre a variação da vazão para as aldeias das Terras Indígenas Paquiçamba e Arara da Volta Grande, a jusante de Pimental. Os comunicados foram realizados por meio do sistema de radiofonia implementado pela Norte Energia entre 2016 e 2022, interligando as aldeias do Médio Xingu entre si e com a cidade de Altamira (Figura 12), e por meio do aplicativo WhatsApp (Figura 13).

Ao longo dos anos, especialmente a partir de 2021, observou-se que as comunicações via rádio foram sendo substituídas por utilização de aplicativo de mensagens. Essa mudança foi influenciada pela intensificação do uso da internet no território, fomentada, também, pela instalação de antenas satelitais no TVR.

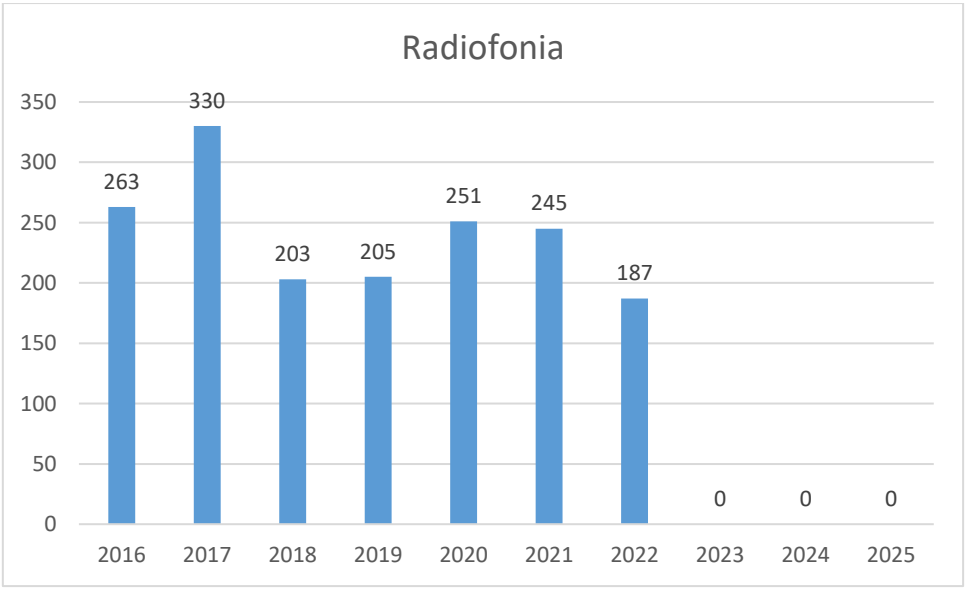


Figura 12 – Envios de informes de vazão na Radiofonia.

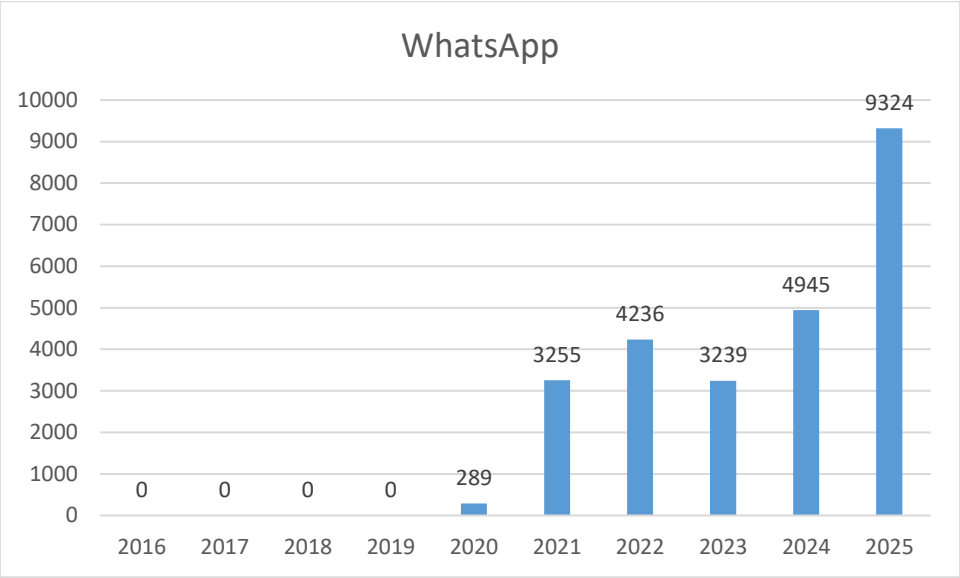


Figura 13 – Envios de informes de vazão no WhatsApp.

No contexto das interações diretas com a população interferida, os ciclos de reuniões comunitárias na Volta Grande do Xingu, apresenta-se como oportunidade estratégica de alinhamento geral, pois no diálogo, os moradores das comunidades expõem seus anseios, tanto para a Norte Energia quanto para os demais comunitários presentes. Assim, para além de inúmeros assuntos que são debatidos, os temas relacionados a operação da UHE Belo Monte, redução da vazão no TVR, aspectos naturais, técnicos, operacionas e regulatórios, são discutidos com a população durante as reuniões.

A Figura 14 apresenta a quantidade de participações nas reuniões em que foi inserida na pauta sobre a redução da vazão. No período entre 2016 e 2025 houve 3.815 participações.

Vale ponderar duas questões. A primeira é relacionada aos anos de 2020, 2023 e 2024, sem registro de participantes, não significa que as reuniões não ocorreram, mas sim que a pauta vazão não foi discutida.

A outra questão se refere aos picos no número de participações de 2019 e 2022, que não necessariamente significa o interesse no tema variação da vazão, mas podendo estar relacionado a outros assuntos atrelados as ações de mitigação. Teoricamente a lógica dos picos nas participações seriam no início da operação e após a operação em plena capacidade geração, sendo os anos de 2016 e 2021.

As Figuras 15 a 18 demonstram o formato em que as reuniões comunitárias são executadas na Volta Grande do Xingu.

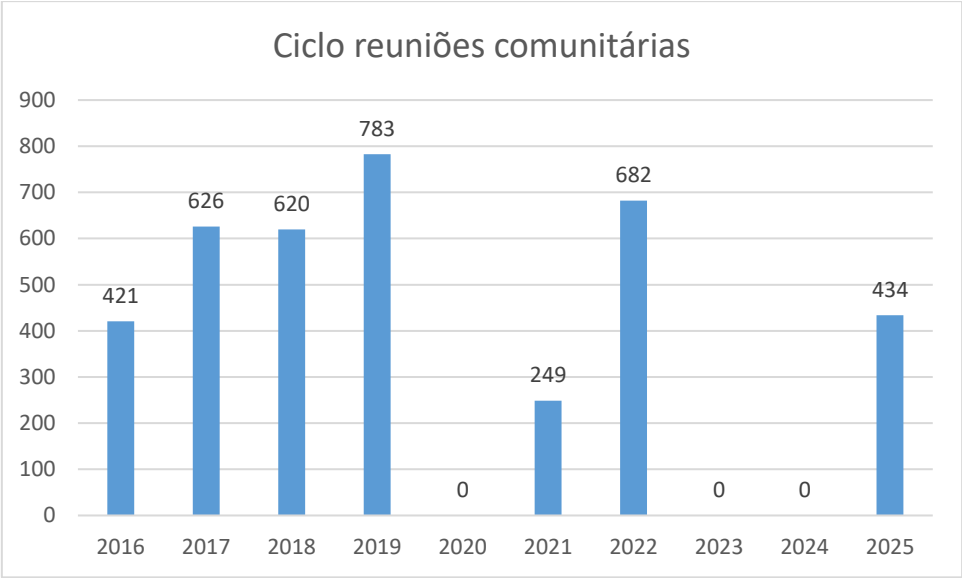


Figura 14 – Participações nos ciclos de reuniões comunitárias.



Figura 15 - Reunião na comunidade Mangueiras.



Figura 16 – Reunião na comunidade Ilha da Fazenda.



Figura 17 – Reunião na comunidade Bacajá.



Figura 18 – Reunião na comunidade Rio das Pedras.

Em relação às reuniões do Colegiado e das Comissões do Fórum de Acompanhamento Social de Belo Monte (FASBM), o diálogo sobre o desenvolvimento dos projetos da UHE Belo Monte é realizado semestralmente com a sociedade civil organizada que representa as comunidades do entorno da Usina, assim como as instituições públicas e o órgão licenciador do empreendimento.

A Figura 19 demonstra a quantidade de instituições participantes das reuniões que tiveram como pauta o tema operação da Usina e, consequentemente, a redução da vazão no TVR. O quantitativo demostra estabilidade na participação a longo dos anos, a não ser para o ano de 2017, que pode ser explicado pelo aumento do interesse pelo

tema no segundo ano de operação da Usina. No período analisado, identificou-se 190 participações de instituições que dialogaram sobre variação da vazão defluente.

As Figuras 20 e 21 apresentam a configuração da realização de reuniões Fórum.

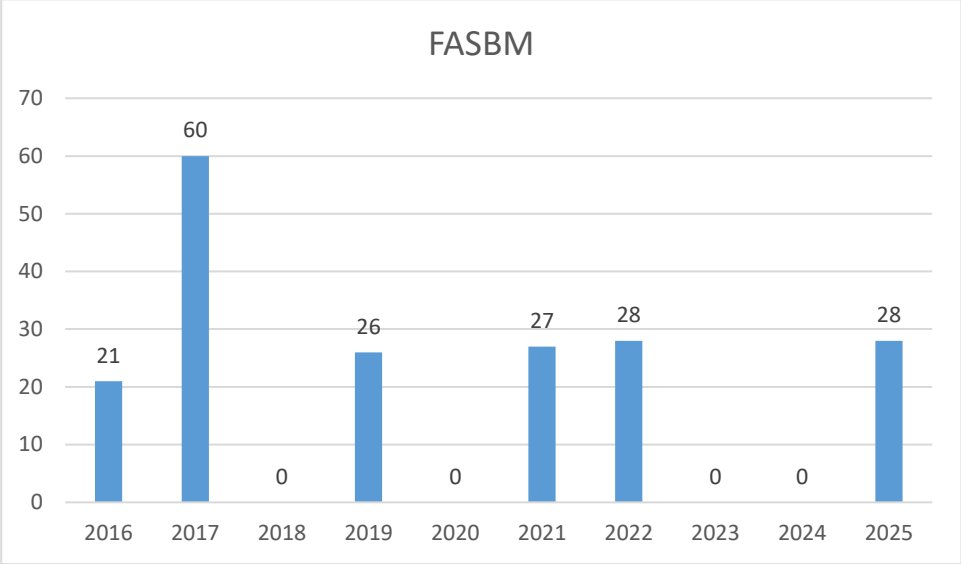


Figura 19 – Participações das instituições no FASBM



Figura 20 - 11ª Reunião ordinária da CVGX.



Figura 21 - Reunião ordinária do CCRTBio.

4. CONCLUSÕES

A operação da UHE Belo Monte, ao influenciar diretamente a variação da vazão no Trecho de Vazão Reduzida, estabelece uma relação contínua entre decisões operacionais e as condições de uso do rio pelas populações a jusante. À luz da literatura sobre Comunicação Social e gestão socioambiental, observa-se que a previsibilidade construída por meio da comunicação reduz assimetrias de informação e apoia comportamentos adaptativos das populações afetadas. Neste sentido, a comunicação deixa de ser acessória e passa a integrar o próprio sistema de gestão de risco associado à operação do empreendimento.

O sistema de comunicação estruturado apresentado neste trabalho, demonstra uma disseminação planejada, organizada e contínua de informações de vazão como um instrumento relevante de gestão de risco, ao reduzir falha de informação entre o operador da UHE Belo Monte e os usuários do rio. Ao permitir que as comunidades se antecipem as mudanças nas condições hidrológicas, a comunicação contribui diretamente para o planejamento de deslocamentos, a proteção de bens e a realização segura das atividades cotidianas.

A adoção de uma estratégia multicanal, combinando meios digitais que totalizaram 74.070 envios de informes prévios e de reuniões presenciais com 4.005 participações, mostrou-se adequada para a difusão da informação, considerando às características do Trecho de Vazão Reduzida, marcado pela dispersão geográfica e limitações de conectividade. Essa redundância operacional fortalece a confiabilidade das estratégicas de comunicação utilizados pela Norte Energia, ampliando o alcance a informação e aumenta as chances de que a comunicação e a orientação cheguem de forma oportuna ao público-alvo.

Do ponto de vista metodológico, o estudo evidencia a importância de integrar aspectos técnicos e sociais na gestão de empreendimentos hidrelétricos, configurando um modelo no qual a comunicação passa a desempenhar função operacional na mitigação de riscos.

Por fim, reconhecem-se limitações na mensuração dos impactos da comunicação, indicando a necessidade de aprimoramento futuro dos indicadores de avaliação de sua efetividade. Nesse contexto, destaca-se o Projeto de Monitoramento das Condições de Vida da População Residente no Trecho de Vazão Reduzida (14.1), que realiza monitoramentos anuais. Em 2025, foram entrevistadas 769 famílias residentes no TVR, sendo que 72,8% das respostas indicaram o uso de ferramentas e estratégias de comunicação da concessionária Norte Energia para o recebimento de informações sobre as ações da UHE Belo Monte. Entre os canais mencionados, destacam-se a RedePop (34,5%), as reuniões presenciais (14,7%), as visitas técnicas (9,1%), o rádio (7,4%) e os Núcleos de Comunicação (7,1%). Além disso, 60,9% das respostas apontaram a RedePop Norte Energia como o canal mais eficiente para acesso às informações. Os resultados reforçam que a comunicação estruturada constitui um componente estratégico para o acesso à informação e a adaptação das populações no contexto do TVR da UHE Belo Monte.

5. PALAVRAS-CHAVE

UHE Belo Monte, Vazão Defluente, Ferramentas de Comunicação; Trecho de Vazão Reduzida, Gestão de Risco, Segurança das Comunidades.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] SANDMAN, P. (1987) – “Risk = Hazard + Outrage”, American Industrial Hygiene Association, Washington.

[2] ZHOURI, A.; OLIVEIRA, R. (2010) – Desenvolvimento, conflitos sociais e violência no Brasil rural. Revista Ambiente & Sociedade.

[3] PERUZZO, C. M. K. (2008) – Comunicação nos movimentos populares: a participação na construção da cidadania. Vozes, Petrópolis.

[4] IBAMA (2014) – Manual de Comunicação Social no Licenciamento Ambiental. Brasília.

[5] MILANEZ, B.; LOSEKANN, C. (2016) – Desenvolvimento e conflitos ambientais. Garamond, Rio de Janeiro.

	**Gustavo SILVA** Coordenador de Relacionamento com Comunidades na Norte Energia, atuando na execução do PBA da UHE Belo Monte há 14 anos. Engenheiro Agrônomo com experiência no relacionamento, interação social e mediação de conflitos junto as populações interferidas. Atualmente, focado na gestão de equipe, com vista a atender os compromissos do licenciamento ambiental em interface com os demais Planos, Programa e Projetos do PBA de Belo Monte.
	**Tássia ESTEVÃO** Analista Socioambiental Pleno na Norte Energia, atuando na UHE Belo Monte com foco em comunicação comunitária, gestão de demandas sociais e apoio ao licenciamento ambiental. Experiência no desenvolvimento de estratégias de comunicação em territórios complexos, com atuação em interface entre operação e comunidades locais.
	**Christian MENDES** Analista Socioambiental Pleno na Norte Energia, atuando na UHE Belo Monte com foco no relacionamento com comunidades e gestão social. Jornalista especializado em Comunicação Corporativa, com experiência em articulação com públicos locais, mediação de conflitos, gestão de núcleos comunitários, apoio ao licenciamento ambiental e interface multidisciplinar.
	**Bruno BAHIANA** Engenheiro Ambiental e Agrícola pela Universidade Federal Fluminense, mestre em Biodiversidade e Conservação pela Universidade Federal do Pará, com especialização em Antropologia e MBA em Petróleo, Gás e Energia. Possui mais de 15 anos de experiência no setor elétrico, com atuação em gestão estratégica de riscos e integração socioambiental. Atualmente é Superintendente Socioambiental e do Componente Indígena da Norte Energia.
	**Renan GIL** Gerente de Socioeconomia na Norte Energia, atuando na gestão de projetos socioeconômicos relacionados ao processo de licenciamento ambiental da UHE Belo Monte e relacionamento com comunidades. Biólogo, especialista em licenciamento ambiental e mestre em ciência do ambiente, com 20 anos de atuação nos setores de meio ambiente e elétrico, com foco na gestão de processos, equipes e interface com as partes interessadas.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

GESTÃO AMBIENTAL E SEGURANÇA DE BARRAGENS COMO TEMAS MATERIAIS EM RELATÓRIOS DE SUSTENTABILIDADE DA UHE TUCURUÍ

Adriana HIGINO ALMEIDA DE SOUZA
Especialista em Gestão Ambiental - Universidade Federal do Pará

Evanice PINHEIRO GOMES
Doutora em Engenharia Civil - Universidade Federal do Pará

RESUMO

Grandes empreendimentos hidrelétricos na Amazônia brasileira desempenham papel estratégico na matriz energética nacional, ao mesmo tempo em que impõem desafios relevantes à gestão ambiental e à segurança de barragens em contextos de elevada sensibilidade socioambiental. Os relatórios de sustentabilidade e ESG têm sido utilizados como instrumentos de transparência corporativa, incorporando temas considerados materiais para a tomada de decisão. Este artigo analisa de que forma a gestão ambiental e a segurança de barragens figuram como temas materiais nos relatórios de sustentabilidade da Eletrobras que contêm informações sobre a Usina Hidrelétrica de Tucuruí. A pesquisa adota abordagem qualitativa, exploratória e descritiva, com base em estudo de caso único e análise de conteúdo temática dos Relatórios Anuais da Eletrobras referentes aos anos-base 2023 e 2024. Os resultados sugerem uma assimetria relevante: a gestão ambiental é tratada como dimensão estratégica estruturada, com indicadores, metas e certificação verificável, enquanto a segurança de barragens tende a ser enquadrada predominantemente como obrigação normativa, com baixa densidade informacional e ausência de dados específicos sobre o empreendimento. Os achados reforçam a compreensão dos relatos ESG como construções institucionais que refletem escolhas sobre o que reportar, contribuindo para o debate sobre os limites desses instrumentos na representação de temas críticos em grandes estruturas geotécnicas na Amazônia.

ABSTRACT

Large hydroelectric projects in the Brazilian Amazon play a strategic role in the national energy matrix while posing significant challenges to environmental management and dam safety, particularly in socio-environmentally sensitive contexts. Sustainability and ESG reports have been used as corporate transparency instruments, incorporating themes considered material for decision-making. This article aims to analyze how environmental management and dam safety are addressed as material themes in Eletrobras' sustainability reports containing information about the Tucuruí Hydroelectric Power Plant. The research adopts a qualitative, exploratory, and descriptive approach, based on a single case study and

thematic content analysis of Eletrobras Annual Reports for the fiscal years 2023 and 2024. The results suggest a relevant asymmetry: environmental management is treated as a structured strategic dimension, supported by indicators, targets, and verifiable certification, whereas dam safety tends to be framed predominantly as a normative obligation, with low informational density and an absence of project-specific data. The findings reinforce the understanding of ESG reports as institutional constructions that reflect choices about what and how to disclose, contributing to the debate on the limitations of these instruments in representing critical themes in large geotechnical structures in the Amazon.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de grandes empreendimentos hidrelétricos na Amazônia brasileira envolve dimensões técnicas, ambientais e institucionais de elevada complexidade, em razão da magnitude das estruturas, da longevidade das operações e da sensibilidade socioambiental dos territórios onde estão inseridos, marcados pela presença de comunidades ribeirinhas e populações tradicionais que dependem diretamente dos sistemas fluviais, além de ecossistemas de elevada fragilidade e biodiversidade [1, 2].

Nesse contexto, os relatórios de sustentabilidade e ESG (Environmental, Social and Governance) consolidaram-se como instrumentos centrais de comunicação corporativa, por meio dos quais as organizações selecionam, priorizam e divulgam informações sobre seus impactos, riscos e estratégias socioambientais. A Usina Hidrelétrica de Tucuruí, um dos maiores empreendimentos hidrelétricos da Amazônia, com 8.370 MW de potência instalada, operada pelo grupo Eletrobras (atual Axia Energia), integra esse contexto e tem seus relatos corporativos como objeto desta análise.

Apesar da crescente adoção de padrões ESG, persistem questionamentos quanto à capacidade desses instrumentos de representar, de forma substantiva, temas críticos como a segurança de barragens, especialmente em contextos socioambientais complexos como a Amazônia. No Brasil, a Política Nacional de Segurança de Barragens, instituída pela Lei nº 12.334/2010, estabelece obrigações formais de monitoramento, gestão de riscos e comunicação com populações afetadas [3]. Contudo, a forma como essas obrigações são incorporadas e enquadradas nos relatos ESG permanece pouco investigada.

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo analisar como a gestão ambiental e a segurança de barragens são tratadas como temas materiais nos relatórios de sustentabilidade da Eletrobras que contêm informações sobre a UHE Tucuruí, à luz dos padrões de relato ESG e do marco normativo aplicável. A relevância do estudo decorre da necessidade de compreender não apenas a presença desses temas nos relatos corporativos, mas as formas de sua organização, priorização e comunicação, considerando possíveis lacunas e limites inerentes aos próprios padrões adotados.

O artigo está organizado em cinco seções. Após esta introdução, a seção 2 apresenta o referencial teórico em três blocos: ESG e materialidade, relatos ESG em hidrelétricas amazônicas e segurança de barragens no contexto regulatório brasileiro. A seção 3 descreve a metodologia. A seção 4 apresenta e discute os resultados. A seção 5 expõe as conclusões.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo estrutura-se em três blocos: o primeiro discute materialidade e relatos ESG como construções institucionais; o segundo situa esses instrumentos no contexto dos empreendimentos hidrelétricos amazônicos; o terceiro apresenta o marco regulatório brasileiro de segurança de barragens e sua relação com os relatos corporativos.

2.1 ESG, materialidade e relatos corporativos como construções institucionais

A incorporação de critérios ambientais, sociais e de governança (ESG) aos processos de prestação de contas das organizações ampliou o papel dos relatórios corporativos como instrumentos de comunicação institucional. Nesse contexto, os relatos de sustentabilidade passaram a sistematizar informações sobre impactos, riscos e estratégias organizacionais, respondendo a demandas crescentes de transparência por parte de investidores, reguladores e demais partes interessadas [4].

Um elemento central nesse processo é o conceito de materialidade, que orienta a seleção e a priorização dos temas a serem reportados. Conforme os padrões da Global Reporting Initiative (GRI), a materialidade refere-se à identificação dos temas que refletem impactos significativos da organização sobre a economia, o meio ambiente e a sociedade, bem como daqueles que influenciam substancialmente as avaliações e decisões das partes interessadas [5]. A metodologia de dupla materialidade, adotada também pelas European Sustainability Reporting Guidelines (ESRG), amplia esse escopo ao incorporar simultaneamente a perspectiva do impacto socioambiental e a perspectiva financeira, buscando maior abrangência na identificação dos temas relevantes [5].

Entretanto, a literatura aponta que a definição da materialidade constitui um processo socialmente construído, mediado por interesses organizacionais, capacidades institucionais e expectativas de partes interessadas selecionadas. Eccles e Serafeim [4] destacam que a materialidade envolve escolhas estratégicas sobre o que reportar e como reportar, o que implica reconhecer que determinados temas podem receber maior ou menor visibilidade nos relatos corporativos. Nesse sentido, os relatórios de sustentabilidade não constituem representações exaustivas da realidade organizacional, mas construções institucionais situadas, resultantes de recortes temáticos e prioridades estratégicas das empresas.

Essa perspectiva é aprofundada por Viégas, Caeiro e Ramos [6], que demonstram que os sistemas de avaliação e relato tendem a privilegiar componentes mensuráveis e formalizáveis, o que pode resultar na sub-representação de dimensões de difícil quantificação, como valores organizacionais, relações de poder e aspectos qualitativos das interações socioambientais. A consequência prática é que temas de elevada relevância técnica ou social podem ser tratados de forma superficial, genérica ou desconexa nos relatos, sem que isso implique necessariamente violação dos padrões adotados.

Broman e Guimarães [7] demonstram esse fenômeno ao analisarem a incorporação da diversidade racial em relatórios padronizados: mesmo em documentos alinhados a padrões reconhecidos, temas socialmente sensíveis podem assumir caráter predominantemente simbólico quando abordados de forma genérica e descontextualizada. O diagnóstico é extensível a outros temas que demandam contextualização territorial, detalhamento técnico e articulação com marcos normativos específicos, como é o caso da segurança de barragens. Avaliações recentes sobre a qualidade dos relatórios brasileiros reforçam essa leitura: a adesão formal a padrões reconhecidos não garante, por si só, a consistência, a comparabilidade ou a relevância das informações reportadas [8]. Esse quadro ganha

contornos específicos quando aplicado ao setor hidrelétrico amazônico, como se examina a seguir.

2.2 Relatos ESG em empreendimentos hidrelétricos na Amazônia

No setor elétrico, e particularmente no âmbito de grandes empreendimentos hidrelétricos, os debates sobre sustentabilidade assumem contornos específicos, em razão da magnitude das obras, da longevidade das estruturas e dos múltiplos impactos socioambientais associados à sua implantação e operação [1]. Em regiões como a Amazônia, esses empreendimentos inserem-se em territórios marcados por elevada sensibilidade ambiental, diversidade sociocultural e disputas em torno da governança dos recursos naturais, o que amplia a complexidade dos processos de comunicação institucional e prestação de contas [2].

Os relatórios corporativos elaborados por empresas do setor hidrelétrico organizam-se, em geral, em torno de eixos como desempenho financeiro, governança, gestão de pessoas, meio ambiente e saúde e segurança, refletindo tanto exigências normativas quanto expectativas institucionais [4]. A seleção e a hierarquização desses temas são fortemente influenciadas pela adoção de padrões de sustentabilidade, como os GRI Standards e o Índice de Sustentabilidade Empresarial da B3 (ISE B3), que conferem estrutura e comparabilidade aos relatos, mas também impõem recortes temáticos que podem não capturar integralmente a complexidade dos contextos analisados [6].

Atkins [9] problematiza diretamente essa questão ao contestar o enquadramento da energia hidrelétrica como energia limpa e renovável nos processos de licenciamento e comunicação corporativa na Amazônia brasileira. O autor argumenta que as avaliações oficiais tendem a privilegiar impactos diretos e espacialmente delimitados, em detrimento de efeitos indiretos, cumulativos e socialmente distribuídos, o que resulta em uma representação parcial e seletiva da sustentabilidade desses empreendimentos. Essa lógica permeia também os relatórios ESG, que operam a partir de critérios de materialidade que, embora úteis para fins de comparabilidade, não são exaustivos na representação de contextos socioecológicos complexos.

Fearnside [2] e Athayde et al. [1] reforçam que os impactos de longo prazo associados às grandes barragens amazônicas frequentemente extrapolam os limites espaciais e temporais considerados nas avaliações convencionais, afetando dinâmicas hidrossedimentológicas, conectividade ecológica e atividades produtivas locais de forma persistente. Essas transformações desafiam os modelos padronizados de relato, que tendem a sistematizar informações com base em indicadores definidos a priori e séries temporais de curto prazo.

O caso da UHE Tucuruí, implantada no rio Tocantins entre 1975 e 1984, com potência instalada de 8.370 MW, é emblemático da hidroeletricidade amazônica pela ampla complexidade socioambiental associada ao reservatório e às populações afetadas [10, 11, 3]. A análise de como seus temas de sustentabilidade e segurança de barragens são comunicados nos relatos corporativos da concessionária responsável constitui, portanto, um recorte analítico relevante para a compreensão dos limites dos instrumentos padronizados de relato ESG em contextos de elevada sensibilidade territorial. Compreender como a segurança de barragens, tema normativo central

nesse contexto, é incorporada aos relatos exige atenção ao marco regulatório brasileiro, abordado na seção seguinte.

2.3 Segurança de barragens no contexto regulatório brasileiro

A segurança de barragens constitui um componente fundamental da gestão de empreendimentos hidrelétricos, envolvendo aspectos técnicos, operacionais, ambientais e institucionais. No Brasil, esse tema passou a contar com marco regulatório específico a partir da promulgação da Lei nº 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) [3]. A legislação estabelece obrigações formais relacionadas ao monitoramento das estruturas, à gestão de riscos, à comunicação e à proteção de populações potencialmente afetadas, definindo responsabilidades dos empreendedores e reforçando a necessidade de transparência na gestão desses empreendimentos.

No âmbito da PNSB, o Plano de Segurança de Barragens (PSB) e o Plano de Ação de Emergência (PAE) configuram-se como os principais instrumentos operacionais. O PSB estabelece as diretrizes para o monitoramento contínuo das estruturas, a gestão de riscos e a prevenção de eventos com potencial de impacto sobre ecossistemas e sistemas hídricos.

O PAE, por sua vez, define as ações a serem adotadas em situações de emergência, incorporando estratégias de comunicação de risco, alerta e envolvimento das populações localizadas na Zona de Autossalvamento (ZAS) [3]. Costa, Gonçalves e Furtado [12] destacam que a efetividade do PAE depende não apenas de sua elaboração formal, mas de processos contínuos de atualização, simulação e integração com os órgãos de defesa civil, aspectos que demandam transparência e comunicação ativa com as comunidades afetadas.

Embora os relatórios ESG não se constituam em instrumentos de cumprimento legal, eles desempenham papel relevante na forma como as organizações comunicam, organizam e priorizam informações relacionadas a essas obrigações normativas. A análise da presença e do tratamento da segurança de barragens nos relatos corporativos permite examinar de que maneira exigências legais são enquadradas e traduzidas no discurso institucional associado à agenda de sustentabilidade. Nesse sentido, a ausência ou o tratamento superficial desses temas nos relatos ESG não representa, necessariamente, descumprimento das obrigações legais, mas indica uma possível desconexão entre a centralidade normativa da segurança de barragens e sua visibilidade como tema material nos instrumentos de comunicação corporativa [6,7].

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) por meio da norma NBR PR 2030-1:2024, que estabelece conceitos, diretrizes e modelo de avaliação ESG para organizações brasileiras, reforça a importância da integração entre gestão de riscos, transparência e responsabilidade socioambiental no âmbito da agenda ESG [13]. Entretanto, assim como os demais instrumentos de relato, sua operacionalização depende das escolhas realizadas pelas organizações quanto ao escopo e ao detalhamento dos temas reportados, o que torna relevante a análise crítica dos conteúdos efetivamente divulgados nos relatórios corporativos.

3. METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, estruturada a partir de estudo de caso único da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. O estudo de caso é compreendido, neste trabalho, como estratégia de pesquisa adequada à investigação aprofundada de fenômenos contemporâneos inseridos em contextos reais e complexos [14, 15], sendo particularmente apropriado quando o interesse analítico recai sobre discursos institucionais, práticas declaradas e processos de significação presentes em documentos organizacionais [15].

O interesse analítico da pesquisa não reside na avaliação da performance técnica ou operacional da usina, mas na forma como os temas de gestão ambiental e segurança de barragens são representados, enquadrados e comunicados nos relatos corporativos da concessionária responsável. Essa abordagem dialoga com contribuições teóricas que problematizam os processos de construção discursiva da sustentabilidade corporativa e os limites entre comunicação institucional, materialidade e prática organizacional [6, 7, 9].

O delineamento metodológico foi organizado nas seguintes fases: (i) definição do problema e dos objetivos; (ii) definição do caso, da sua delimitação, e seleção do corpus documental; (iii) definição das categorias analíticas a priori, com base nos objetivos específicos; (iv) análise de conteúdo temática, com base nas categorias temáticas e considerando os tipos de unidade de análise; (v) construção da matriz de conteúdo; e (vi) interpretação dos resultados à luz do referencial teórico e normativo adotado. A síntese do delineamento metodológico está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 — Delineamento metodológico: categorias, critérios, unidade de análise e exemplo.

Categoria temática	Critérios de inclusão	Tipos de unidade de análise	Exemplo de inferência analítica
Sustentabilidade	Trechos que abordem: definição e processo de materialidade; estratégia ESG; governança de sustentabilidade; gestão ambiental; metas, indicadores e séries históricas ambientais; alinhamento a padrões de relato (GRI, SASB, TCFD).	Seções de materialidade; capítulos temáticos; quadros de governança; índices de conteúdo; tabelas de indicadores; metas e compromissos declarados	Avaliação do nível de priorização, detalhamento e ancoragem estratégica dos temas ambientais nos relatos, identificando se são tratados como compromissos verificáveis ou como narrativas declaratórias.
Segurança de barragens	Trechos que abordem: PAE; PSB; PNSB; monitoramento de estruturas; gestão de riscos operacionais; ZAS; comunicação de risco e engajamento com comunidades em contexto de	Seções narrativas; menções a instrumentos normativos; descrições de ações e eventos associados à segurança de barragens;	Avaliação do enquadramento do tema, normativo versus estratégico, da presença ou ausência de indicadores técnicos e dados por empreendimento, e das formas de comunicação

	emergência.	indicadores de desempenho (quando presentes)	institucional dos riscos associados às estruturas.

Fonte: Elaboração da autora, 2026. Adaptado de Bardin (2016), Silva, Gobbi e Simão (2005) e Silva e Fossá (2015).

3.1 Corpus documental

O corpus da pesquisa é composto por dois relatórios de sustentabilidade divulgados pela concessionária responsável pelo empreendimento: o Relatório Anual referente ao ano-base 2023, publicado em maio de 2024, e o Relatório Anual referente ao ano-base 2024, publicado em abril de 2025 [16, 17]. A seleção foi orientada pela atualidade dos documentos e por sua relevância para os objetivos do estudo, configurando-se também como exercício de viabilidade metodológica para ampliação futura da análise a uma série temporal mais extensa.

Essa delimitação busca assegurar profundidade interpretativa e rigor analítico, sem pretensão de exaustividade, aspecto que será desenvolvido em etapa subsequente da investigação. Foram considerados exclusivamente documentos públicos, disponibilizados nos sítios institucionais das empresas, por se tratar de instrumentos formais de comunicação corporativa e de prestação de contas socioambientais.

Ressalta-se que os relatórios analisados possuem caráter corporativo, abrangendo o conjunto de ativos e operações da organização, e não sendo elaborados especificamente para a UHE Tucuruí. Nesse sentido, a análise concentrou-se na identificação e interpretação dos conteúdos relacionados ao empreendimento no interior dos documentos institucionais, considerando as formas de enquadramento e apresentação dos temas investigados.

3.2 Procedimentos de análise

A análise dos dados foi conduzida por meio de análise de conteúdo temática, seguindo a metodologia proposta por Bardin [18], adaptada para o contexto do estudo, e organizada em três etapas: pré-análise, definição das unidades de análise e elaboração da matriz de conteúdo.

A pré-análise compreendeu a leitura flutuante dos relatórios selecionados (leitura exploratória, integral e não codificada), com o objetivo de apreender a estrutura geral dos documentos, a linguagem empregada e os principais enquadramentos discursivos mobilizados nos relatos institucionais [19, 20].

As categorias analíticas foram definidas a priori com base nos objetivos do estudo, limitando-se a dois temas: sustentabilidade e segurança de barragens. A análise orientou-se não apenas pela identificação da presença desses temas nos relatórios, mas também pela avaliação de sua forma de enquadramento, nível de detalhamento, indicadores associados e possíveis lacunas na comunicação corporativa. A Tabela 1 sintetiza as categorias, os critérios de inclusão adotados e os tipos de unidade de análise buscados em cada dimensão.

Considerando o caráter corporativo dos relatórios analisados, foram adotados critérios de leitura e seleção voltados à identificação de trechos, indicadores e informações que apresentassem relação direta ou indireta com o empreendimento em estudo. Essa estratégia permitiu delimitar analiticamente o objeto de estudo no interior de documentos de escopo ampliado, preservando a coerência entre o corpus analisado e os objetivos da pesquisa.

A partir da categorização dos conteúdos, apresentada na Tabela 2 (Distribuição dos temas de sustentabilidade e segurança de barragens nos relatórios da Eletrobras com informações sobre a UHE Tucuruí) foi construída a matriz de conteúdo, apresentada na Tabela 3 (Síntese da matriz de conteúdo dos temas de sustentabilidade e segurança de barragens nos relatórios da Eletrobras com informações sobre a UHE Tucuruí). Estes dois elementos compõem o instrumento central da análise, que sistematiza os temas identificados por categoria analítica, fonte e ano, permitindo examinar a distribuição, a priorização e a forma de apresentação dos temas materiais nos relatórios analisados. As interpretações permaneceram restritas ao plano documental-discursivo, sem pretensão de auditoria de conformidade ou verificação empírica das práticas declaradas [15].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir baseiam-se na análise dos Relatórios Anuais da Eletrobras referentes aos anos-base 2023 e 2024, únicos documentos que compõem o corpus desta etapa da pesquisa. Dado o caráter exploratório do estudo, as interpretações são apresentadas com o grau de cautela compatível com a extensão do corpus analisado, sendo compreendidas como achados preliminares a serem aprofundados em etapa futura da investigação.

4.1 Distribuição dos temas nos relatórios analisados

A análise dos relatórios permitiu identificar um conjunto de temas associados à gestão ambiental e à segurança de barragens, sistematizados nas categorias analíticas definidas *a priori*, com base nos objetivos específicos do estudo.

De modo geral, observa-se que os temas relacionados à sustentabilidade apresentam maior diversidade e detalhamento, abrangendo aspectos como: definição de materialidade por dupla metodologia (GRI e ESRG), estratégia climática com meta net zero, gestão de recursos hídricos, biodiversidade, certificação ISO 14001 específica para a UHE Tucuruí e elaboração de roadmap ESG com horizonte estratégico de longo prazo. Em contraste, os conteúdos associados à segurança de barragens concentram-se em um conjunto mais restrito de tópicos, abrangendo a existência e atualização do PAE, parceria com a Defesa Civil, realização de simulado de evacuação da instalação e referência à Política e Regulamento Interno de Segurança de Barragens, alinhados à PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010), sem equivalente em termos de estrutura, indicadores ou verificação externa.

Cabe destacar que, embora a gestão ambiental seja amplamente representada por meio de subtemas específicos (biodiversidade, recursos hídricos, mudanças

climáticas, certificação ISO 14001), ela não figura, nos documentos analisados, como tema material nomeado de forma autônoma nas matrizes de materialidade — assimetria discutida em detalhe na seção 4.3.

Essa distribuição sugere uma assimetria na amplitude temática entre as duas categorias analisadas, indicando que a gestão ambiental recebe maior visibilidade, desenvolvimento e ancoragem estratégica nos relatos corporativos. A Tabela 2 detalha essa distribuição por categoria e ano-base, incluindo as ausências relevantes identificadas em cada dimensão.

Os acrônimos utilizados na Tabela 2 referem-se a: SBTi (*Science Based Targets initiative*), iniciativa internacional de definição de metas climáticas alinhadas à ciência; IGS (Sistema de Indicadores de Gestão da Sustentabilidade), ferramenta interna de monitoramento da Eletrobras; ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável), agenda global da ONU; SASB (*Sustainability Accounting Standards Board*), padrão de divulgação de informações de sustentabilidade por setor; TCFD (*Task Force on Climate-related Financial Disclosures*), estrutura de reporte de riscos climáticos financeiros.

Tabela 2 — Distribuição dos temas de sustentabilidade e segurança de barragens nos relatórios da UHE Tucuruí

Categoria analítica	Ano-base	Localização no relatório	Temas abordados	Exemplos de indicadores e práticas reportadas	Ausências relevantes
Sustentabilidade	2023	Cap. 1 (Temas materiais) e Cap. 5 (Planeta)	Dupla materialidade (GRI + ESRG); 10 temas materiais definidos; estratégia ESG; mudanças climáticas; biodiversidade; gestão de recursos hídricos	Certificação ISO 14001 específica para a UHE Tucuruí; meta net zero 2030 (SBTi); Sistema IGS; Política Ambiental; Comitê de Meio Ambiente; alinhamento a ODS; reporte GRI, SASB e TCFD	"Gestão ambiental" e "segurança de barragens" ausentes como temas materiais nomeados nas matrizes de materialidade (embora subtemas de gestão ambiental estejam presentes); indicadores ambientais não desagregados por empreendimento
Sustentabilidade	2024	Cap. 2 (Gestão da sustentabilidade), Cap. 4 (Estratégia Climática) e	Matriz de materialidade 2023 mantida sem revisão; Jornada de Sustentabilida	Roadmap ESG incorporado ao Plano Estratégico 2025+;	Segurança de barragens ausente dos temas da Jornada de Sustentabilida

		Cap. 6 (Meio Ambiente)	de com roadmap ESG; estratégia climática como capítulo autônomo; governança ambiental estruturada	inclusão dos índices SASB e TCFD nos anexos; criação da Diretoria de Licenciamento Ambiental e Condicionantes (nov./2023); ESG roadshow com investidores europeus	de e do roadmap ESG; ausência de novo ciclo de materialidade; dados ambientais por empreendimento não reportados
Segurança de barragens	2023	Cap. 4 (Pessoas) - Relacionamento com comunidades	PAE alinhado à PNSB; comunicação de risco com comunidades a jusante; parceria com Defesa Civil; simulado de evacuação	PAE com lista de contatos internos e externos; disponibilização em plataforma online; simulado em Tucuruí (PA) e Breu Branco (PA), ~25 mil pessoas em 7 dias (nov./2023); instalação de rotas de fuga e pontos de encontro	Ausência de capítulo ou seção dedicada; sem dados de monitoramento estrutural ou classificação de risco da barragem; sem avaliação de eficácia do PAE; informações agregadas para o conjunto das usinas, sem discriminação por empreendimento
Segurança de barragens	2024	Cap. 7 (Comunidades) - Gestão de impactos - PAE	Política e Regulamento Interno de Segurança de Barragens (PNSB); PAE; Zona de Autossalvamento (ZAS); gestão de incidentes	PAE atualizado anualmente; sistema de notificação e alerta na ZAS; entrega dos planos às prefeituras e Defesas Civis; Comissão de Análise de incidentes com relatórios de causas e ações	ZAS mencionada sem dados associados à UHE Tucuruí; ausência de indicadores de monitoramento estrutural e de resultados de inspeção; sem referência ao SNISB ou à classificação de risco da barragem; informações sobre

				corretivas	incidentes não discriminadas por usina

Fonte: Eletrobras (2024; 2025), adaptação da autora, 2026.

Dos oito indicadores e práticas reportadas identificados na categoria sustentabilidade, ao longo dos dois anos analisados, nenhum é desagregado por empreendimento. Na categoria segurança de barragens, dos quatro exemplos registrados, nenhum apresenta dado técnico específico sobre a UHE Tucuruí.

4.2 Forma de apresentação e nível de detalhamento

Os temas identificados são comunicados por meio de estratégias distintas, o que revela diferenças não apenas na frequência de aparição, mas no nível de aprofundamento e operacionalização de cada dimensão nos relatos.

Os conteúdos relacionados à gestão ambiental são apresentados com maior densidade informacional e são acompanhados de indicadores quantitativos, metas com prazos definidos, séries históricas e certificação com verificação externa periódica. A manutenção da ISO 14001 para a UHE Tucuruí, auditada em dezembro de 2023, e a inclusão dos índices SASB e TCFD nos anexos do RA 2024 ilustram esse padrão de estruturação e rastreabilidade.

Os temas associados à segurança de barragens, por outro lado, são apresentados predominantemente de forma descritiva e narrativa, com ênfase na existência de instrumentos normativos, como o PAE, a PNSB, a Política Interna de Segurança de Barragens e na realização de ações pontuais, como o simulado de evacuação realizado em novembro de 2023, na instalação. Esse evento, descrito como o maior do tipo já realizado no país, que mobilizou cerca de 25 mil pessoas em sete dias, recebe tratamento que privilegia sua escala e visibilidade institucional, sem apresentação de indicadores de desempenho ou avaliação de eficácia do PAE. Observa-se, ainda, que as informações sobre segurança de barragens são agregadas para o conjunto das usinas da Eletrobras, sem discriminação por empreendimento, o que limita a compreensão do caso específico da hidrelétrica Tucuruí.

Essa diferença de tratamento indica uma possível hierarquização implícita entre os temas, em que a gestão ambiental é operacionalizada como dimensão estratégica verificável, enquanto a segurança de barragens tende a ser enquadrada como obrigação normativa cumprida.

Confronto entre o conteúdo reportado, os padrões de relato ESG e o marco normativo. A assimetria identificada torna-se mais evidente quando os conteúdos reportados são confrontados com os referenciais apresentados na seção 2. No caso da gestão ambiental, o tratamento observado nos relatórios corresponde de forma consistente à lógica da dupla materialidade proposta pela GRI e pelas ESRG [5]: há identificação formal de temas materiais, indicadores quantitativos, metas com prazo definido e verificação externa (certificação ISO 14001, índices SASB e TCFD), elementos que caracterizam um relato alinhado aos padrões internacionais de sustentabilidade discutidos na seção 2.1.

O mesmo grau de alinhamento não se verifica em relação à segurança de barragens frente ao marco normativo da PNSB (Lei nº 12.334/2010) [3]. Embora a legislação estabeleça, por meio do PSB e do PAE, obrigações específicas de monitoramento estrutural, gestão de riscos e classificação junto ao SNISB (seção 2.3), os relatórios analisados restringem-se à menção da existência desses instrumentos, sem incorporar os dados técnicos que a própria PNSB exige como parte da gestão de riscos. Essa lacuna é particularmente relevante à luz da norma NBR PR 2030-1:2024 da ABNT, que recomenda explicitamente a integração entre gestão de riscos, transparência e responsabilidade socioambiental como parte da agenda ESG das organizações brasileiras [13]. Ou seja: o próprio referencial normativo brasileiro para relatos ESG orienta a incorporação de temas como a segurança de barragens em bases equivalentes às adotadas para a gestão ambiental, orientação que os relatórios analisados ainda não refletem de forma plena.

4.3 Lacunas, silêncios e enquadramento institucional

Para além dos conteúdos explicitamente apresentados, a análise permite identificar lacunas e silêncios relevantes nos relatos examinados, conforme sintetizado na Tabela 3.

Tabela 3 — Síntese da matriz de conteúdo dos temas de sustentabilidade e segurança de barragens nos relatórios da UHE Tucuruí

Categoria temática	Fonte	Unidade de análise	Inferência e interpretação
Sustentabilidade	RA 2023, Eletrobras	“Como resultado, chegamos a uma matriz de materialidade que prioriza dez tópicos considerados materiais” (lista inclui: Biodiversidade, Gestão dos recursos hídricos, Mudanças climáticas, sem “gestão ambiental” ou “segurança de barragens” como categorias nomeadas)	A gestão ambiental não aparece como tema material explícito, sendo representada de forma fragmentada por subtemas específicos. Isso sugere uma abordagem seletiva da materialidade ambiental, com ênfase em dimensões mais próximas à estratégia de negócios e ao mercado de capitais.
Sustentabilidade	RA 2023, Eletrobras	“Entre os temas considerados materiais em 2022, apenas Gestão de Riscos e Emergências e Direitos Humanos não fazem parte da matriz mais recente. Entretanto, ambos os temas são de reporte obrigatório no relatório anual segundo as diretrizes da GRI e do Relato Integrado.”	A exclusão de “Gestão de Riscos e Emergências” da matriz 2023, justificada por sua obrigatoriedade de reporte, indica que o tema passou a ser tratado como requisito formal, e não como prioridade estratégica. Essa reconfiguração da materialidade reduz a visibilidade dos riscos operacionais, incluindo os associados à segurança de barragens.
Sustentabilidade	RA 2023, Eletrobras	“Nosso sistema de gestão ambiental possui	A certificação ISO 14001 específica para a UHE

		certificação ISO 14.001 para a geração de energia elétrica na UHE Tucuruí (8.370 MW) […] que passou por auditoria em dezembro de 2023 e recebeu o certificado em janeiro de 2024.”	Tucuruí evidencia estrutura formal de gestão ambiental com verificação externa periódica. Esse nível de institucionalização (com escopo definido, auditoria independente e referência explícita ao empreendimento) não tem equivalente para a segurança de barragens nos documentos analisados.
Sustentabilidade	RA 2024, Eletrobras	“Os temas materiais relacionados à sustentabilidade definidos ao longo da Jornada de Sustentabilidade não são os mesmos da matriz de materialidade da companhia […] pois têm objetivos diferentes.” (Temas da Jornada: mudanças climáticas, transição energética, biodiversidade, gestão de recursos hídricos, saúde do trabalhador, relacionamento com comunidades, sem segurança de barragens)	A “Jornada de Sustentabilidade” introduzida em 2024, com roadmap ESG de longo prazo, amplia o arcabouço de planejamento estratégico da companhia, mas mantém a ausência da segurança de barragens como tema explícito. A lacuna persiste mesmo em processos de planejamento prospectivo, reforçando o padrão observado no ciclo anterior.
Segurança de barragens	RA 2023, Eletrobras	“Seguindo a Política Nacional de Segurança de Barragem, as usinas da Eletrobras possuem Planos de Atendimento a Emergências (PAEs), que reúnem as ações necessárias para proteger as populações, as propriedades e o meio ambiente situados a jusante das barragens em casos de emergência.”	A segurança de barragens é introduzida exclusivamente por referência à conformidade com a PNSB, sem dados sobre monitoramento estrutural, classificação de risco ou resultados de inspeção. O enquadramento é orientado à resposta emergencial e ao cumprimento normativo, sem dimensão estratégica ou prospectiva no relato.
Segurança de barragens	RA 2023, Eletrobras	“Em novembro, promovemos nos municípios de Tucuruí (PA) e Breu Branco (PA) o primeiro Simulado de Evacuação de Emergência da Usina hidrelétrica de Tucuruí — o maior simulado do tipo já feito no país […] mobilizou aproximadamente 25 mil pessoas em sete dias de atividades.”	O simulado de Tucuruí (único trecho do relatório em que o empreendimento é mencionado por nome no contexto de segurança de barragens) recebe tratamento narrativo e institucional, sem indicadores de desempenho, avaliação de eficácia do PAE ou dados técnicos. O destaque recai sobre a escala do evento e a visibilidade pública, e não

			sobre a gestão do risco.
Segurança de barragens	RA 2023, Eletrobras	“Atualmente, nossas usinas se encontram em estágios distintos de implantação do plano, algumas com planos ativos e outras em fase de instalação ou de realização de simulados.”	A referência ao conjunto das usinas sem discriminação por empreendimento impede a avaliação do caso específico da UHE Tucuruí. A agregação corporativa das informações de segurança de barragens é, em si, um limite analítico relevante, que reflete a natureza dos relatórios como instrumentos de comunicação institucional e não como documentos de transparência técnica.
Segurança de barragens	RA 2024, Eletrobras	“A Eletrobras possui uma Política e Regulamento Interno de Segurança de Barragens, alinhados à Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). […] A Eletrobras é responsável pelo sistema de notificação e alerta na Zona de Autossalvamento (ZAS), área definida conforme a legislação vigente.”	Em 2024, a segurança de barragens é apresentada por referência à existência de instrumentos normativos internos, sem divulgação de dados sobre a ZAS de Tucuruí, resultados de monitoramento ou ocorrências registradas. A menção à ZAS sem informações associadas ilustra o caráter declaratório do tratamento do tema, em contraste com o detalhamento observado nas seções de gestão ambiental do mesmo relatório.

Fonte: Eletrobras (2024; 2025), adaptação da autora, 2026.

Destacam-se, em particular, as seguintes ausências: (i) dados de monitoramento estrutural da barragem; (ii) classificação de risco do empreendimento conforme o SNISB; (iii) informações sobre a Zona de Autossalvamento (ZAS) de Tucuruí, mencionada no RA 2024, mas sem dados associados ao empreendimento; (iv) resultados ou avaliação de eficácia do PAE após o simulado de 2023; e (v) referência à classificação da barragem no âmbito do SNISB.

Esse padrão converge com achados de Atkins [9], que identificou tendência semelhante nos processos de licenciamento amazônico: a prevalência de enquadramentos que privilegiam conformidade formal em detrimento de transparência substantiva. De modo análogo, Broman e Guimarães [7] demonstraram que temas sensíveis tendem a ser incorporados de forma genérica e descontextualizada mesmo em relatórios alinhados a padrões reconhecidos, limitação que os dados da UHE Tucuruí reforçam empiricamente.

Esses elementos reforçam a compreensão dos relatos ESG como construções institucionais que refletem escolhas sobre o que reportar e como reportar [4, 6, 7], e

não como representações exaustivas da realidade organizacional. A análise evidencia uma possível desconexão entre a centralidade normativa da segurança de barragens, tema estruturado por legislação específica, com instrumentos obrigatórios e prazos definidos, e sua visibilidade nos relatos ESG, indicando que a lógica da materialidade corporativa pode não captar integralmente a relevância desses temas em contextos de elevado risco socioambiental [6, 9]. Essa noção de enquadramento, entendido como a escolha de como organizar e apresentar informações, determinando o que ganha ou perde visibilidade, está implícita na literatura sobre materialidade corporativa [4, 6] e é central para interpretar os achados deste estudo.

4.4 Implicações

Os achados apresentados têm implicações em três dimensões: gestão, regulação e transparência.

Do ponto de vista da gestão, os resultados sugerem que a incorporação da segurança de barragens como tema estratégico nos relatos ESG, e não apenas como requisito normativo, poderia contribuir para maior transparência sobre riscos, práticas e resultados de monitoramento, em benefício das partes interessadas, especialmente das comunidades localizadas a jusante.

Do ponto de vista regulatório, observa-se uma oportunidade de aproximação entre os padrões de relato ESG e o marco normativo da PNSB, de modo a conferir maior coerência entre as obrigações legais das concessionárias e os conteúdos efetivamente divulgados nos instrumentos voluntários de prestação de contas.

Do ponto de vista da transparência institucional, os resultados indicam que relatórios corporativos de escopo ampliado tendem a produzir uma generalização dos conteúdos que pode limitar a visibilidade de especificidades associadas aos empreendimentos individuais, o que é particularmente sensível no caso de grandes barragens em contextos socioambientais complexos como a Amazônia [1, 2].

4.5 Limitações

As limitações deste estudo devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Em primeiro lugar, o corpus analisado restringe-se a dois relatórios anuais, o que não permite afirmações sobre tendências temporais ou padrões consolidados de relato, aspecto a ser desenvolvido com a ampliação da série documental em etapa futura.

Em segundo lugar, os relatórios analisados possuem caráter corporativo, abrangendo o conjunto de operações da Eletrobras, e não foram elaborados especificamente para a UHE Tucuruí. As informações relativas ao empreendimento precisaram ser identificadas e interpretadas no interior de documentos de escopo mais amplo, o que pode implicar níveis diferenciados de detalhamento e visibilidade.

Em terceiro lugar, a análise restringe-se ao plano documental-discursivo, sem verificação empírica das práticas declaradas, o que é inerente à abordagem adotada, mas impõe limites às inferências sobre a efetividade das ações reportadas.

Por fim, o recorte de caso único, embora adequado aos objetivos exploratórios desta etapa, não permite generalizações para outros empreendimentos hidrelétricos ou empresas do setor elétrico.

CONCLUSÕES

A estrutura de relato das práticas ESG não representa automaticamente a realidade, ela organiza e enquadra essa realidade, e isso tem implicações diretas para como a segurança de barragens é comunicada.

O estudo analisou, com base nos Relatórios Anuais da Eletrobras referentes aos anos-base 2023 e 2024, como os temas de gestão ambiental e segurança de barragens são incorporados como temas materiais nos relatos de sustentabilidade que contêm informações sobre a UHE Tucuruí, evidenciando diferenças na forma de organização, priorização e comunicação dessas dimensões.

Os resultados indicam que, embora os relatórios ESG contribuam para a divulgação de informações relevantes, sua capacidade de representar de forma abrangente e substantiva temas críticos, como a segurança de barragens, é limitada por fatores associados à definição da materialidade, às estratégias organizacionais e aos próprios padrões de relato adotados.

Do ponto de vista aplicado, o estudo contribui para o aprimoramento das práticas de relato e para o fortalecimento da transparência na gestão de empreendimentos hidrelétricos.

Como limitações, destaca-se: (i) o recorte do estudo a um único caso e a natureza documental da análise, sugerindo-se a ampliação futura para outros empreendimentos e a incorporação de diferentes fontes de dados; (ii) os relatórios analisados possuem caráter corporativo, não sendo elaborados exclusivamente para o empreendimento investigado, o que pode implicar níveis diferenciados de detalhamento e especificidade das informações relacionadas à UHE Tucuruí.

Observa-se ainda que o caráter corporativo dos relatórios tende a produzir uma generalização dos conteúdos, o que pode limitar a visibilidade de especificidades associadas a empreendimentos individuais, como a hidrelétrica Tucuruí.

5. PALAVRAS-CHAVE

Gestão ambiental; Segurança de barragens; Relatórios ESG; Temas materiais; Usina hidrelétrica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ATHAYDE, S.; SILVA-JUNIOR, U.; DAMÁSIO, L.; KAHN, J.; PALM, C.; JOHANSEN, I. (2019) – "Mapping research on hydropower and sustainability in the Brazilian Amazon", *Energy Research & Social Science*, vol. 50, pp. 36–52.

[1] ATHAYDE, S.; SILVA-JUNIOR, U.; DAMÁSIO, L.; KAHN, J.; PALM, C.; JOHANSEN, I. (2019) – “Mapping research on hydropower and sustainability in the Brazilian Amazon”, Energy Research & Social Science, vol. 50, pp. 36–52.

[2] FEARNSIDE, P.M. (2015) – “Environmental and social impacts of hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: implications for the aluminum industry”, World Development, vol. 77, pp. 48–65.

[3] BRASIL (2010) – “Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e dá outras providências”, Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 set. 2010.

[4] ECCLES, R.G.; SERAFEIM, G. (2013) – “The performance frontier: innovating for a sustainable strategy”, Harvard Business Review, vol. 91, n. 5, pp. 50–60.

[5] GRI – GLOBAL REPORTING INITIATIVE (2023) – “GRI Standards”, GRI, Amsterdã. Disponível em: https://www.globalreporting.org/standards/. Acesso em: 21 jan. 2026.

[6] VIÉGAS, C.; CAEIRO, S.; RAMOS, T.B. (2018) – “Modelo conceitual para integração de componentes não materiais na avaliação da sustentabilidade”, Journal of Cleaner Production, vol. 181, pp. 224–237.

[7] BROMAN, G.; GUIMARÃES, L. (2024) – “A diversidade racial em relatórios de sustentabilidade padronizados: um tema material”, Revista de Administração de Empresas, São Paulo, vol. 64, n. 2, pp. 1–15.

[8] CEBDS – CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (2024) – “Reporting Matters Brasil 2024: avaliação da qualidade dos relatórios de sustentabilidade”, CEBDS, Rio de Janeiro.

[9] ATKINS, E. (2020) – “Contesting the ‘greening’ of hydropower in the Brazilian Amazon”, Political Geography, vol. 80, pp. 1–11.

[10] CAMPOS, P.H.P. (2019) – “Ditadura, interesses empresariais e desenvolvimentismo: a obra da usina hidrelétrica de Tucuruí”, Revista Tempo e Argumento, Florianópolis, vol. 11, n. 26, pp. 255–286.

[11] BARROS, K.D.N.; BRABO, M.F.; FERREIRA, A.C. (2020) – “Impactos de usinas hidrelétricas sobre os recursos pesqueiros amazônicos: os casos de Tucuruí e Belo Monte”, Gaia Scientia, João Pessoa, vol. 14, n. 4, pp. 1–15.

[12] COSTA, D.P.; GONÇALVES, G.; FURTADO, A.S.O. (2019) – “Proposta de implantação do Plano de Ação de Emergência em ciclos”, Revista Brasileira de Engenharia de Barragens, Rio de Janeiro, ano V, n. 7, pp. 33–38.

[13] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2024) – “NBR PR 2030-1:2024: ESG – Parte 1: conceitos, diretrizes e modelo de avaliação e direcionamento para organizações”, ABNT, Rio de Janeiro.

[14] YIN, R.K. (2015) – “Estudo de caso: planejamento e métodos”, 5. ed., Bookman, Porto Alegre.

[15] MINAYO, M.C.S. (2014) – “O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde”, 14. ed., Hucitec, São Paulo.

[16] ELETROBRAS (2024) – “Relatório Anual 2023”, Eletrobras, Rio de Janeiro. Disponível em: https://eletrobras.com/pt/Paginas/Relatorio-Anual.aspx. Acesso em: 23 jan. 2026.

[17] ELETROBRAS (2025) – “Relatório Anual 2024”, Eletrobras, Rio de Janeiro. Disponível em: https://eletrobras.com/pt/Paginas/Relatorio-Anual.aspx. Acesso em: 23 jan. 2026.

[18] BARDIN, L. (2016) – “Análise de conteúdo”, Edições 70, São Paulo.

[19] SILVA, C.R.; GOBBI, B.C.; SIMÃO, A.A. (2005) – “O uso da análise de conteúdo como uma ferramenta para a pesquisa qualitativa: descrição e aplicação do método”, Organizações Rurais & Agroindustriais, Lavras, vol. 7, n. 1, pp. 70–81.

[20] SILVA, A.H.; FOSSÁ, M.I.T. (2015) – “Análise de conteúdo: exemplo de aplicação da técnica para análise de dados qualitativos”, Qualit@s: Revista Eletrônica, Campina Grande, vol. 17, n. 1, pp. 1–14.

	**Adriana HIGINO ALMEIDA DE SOUZA** Tecnóloga em Controle Ambiental (IFPA, 2004), pós-graduada em Gestão Ambiental (UFPA), Gestão de Pessoas (PUC-RS) e Docência no Ensino Superior (SENAC-SP). Mestranda no PEBGA/NDAE (UFPA), na área de Barragem e Meio Ambiente, linha Planejamento e Gestão Ambiental, pesquisa sustentabilidade no setor de geração de energia na Amazônia, com ênfase em grandes barragens.
	**Evanice PINHEIRO GOMES** Engenheira Sanitária e Ambiental (UFPA, 2014), mestre (2017) e doutora (2022) em Engenharia Civil, com ênfase em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGEC/UFPA). Professora Adjunta da Faculdade de Engenharia Civil (CAMTUC/UFPA), docente permanente do PEBGA e pesquisadora do GEAMAZ, com atuação em desenvolvimento regional sustentável, modelagem ambiental, geoprocessamento e saneamento.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

GESTÃO AMBIENTAL E SOCIOPATRIMONIAL DAS APPS DOS RESERVATÓRIOS DA UHE BELO MONTE COMO INSTRUMENTO ESTRATÉGICO DE SEGURANÇA OPERACIONAL DA USINA

Gilvania SANTOS KÜLL
Engenheira Ambiental – Norte Energia S.A.

José Maria MARTINS DO NASCIMENTO JÚNIOR
Engenheiro Florestal – Norte Energia S.A.**Erro! Indicador não definido.**

Pedro Henrique CORDEIRO DOS SANTOS ALVES
Engenheiro Ambiental – Norte Energia S.A.

Roberto LEANDRO DA SILVA
Biólogo – Norte Energia S.A.

Bruno GONÇALVES BAHIANA
Engenheiro Ambiental – Norte Energia S.A.

RESUMO

As Áreas de Preservação Permanente (APP) dos reservatórios da Usina Hidrelétrica Belo Monte abrangem aproximadamente 26 mil hectares e desempenham papel estratégico que extrapola sua função ecológica prevista no Código Florestal Brasileiro. A integridade das APPs está diretamente associada à segurança das estruturas hidráulicas, uma vez que intervenções antrópicas como queimadas, ocupações irregulares, supressão vegetal, presença de gado e abertura de acessos podem comprometer a estabilidade ambiental e operacional do empreendimento. Nesse contexto, o Programa de Gestão Ambiental e Sociopatrimonial (PGASP), implementado pela Norte Energia, estabelece uma estratégia contínua de vigilância patrimonial e monitoramento ambiental, com o suporte de tecnologias como aeronaves remotamente pilotadas (RPAS). Este artigo tem como objetivo apresentar as medidas de proteção adotadas pelo programa, bem como analisar seus resultados obtidos em 2025. No período, foram registrados 80 eventos de irregularidades, com predominância de queimadas e ocupações irregulares, evidenciando a pressão antrópica sobre a APP. Paralelamente, foram executadas ações de cercamento e sinalização, totalizando mais de 20 km implantados no período, além de iniciativas de educação ambiental que alcançaram mais de mil participantes. Os resultados demonstram que a integração entre tecnologia, gestão territorial e sensibilização social constitui ferramenta essencial para a manutenção das APPs, contribuindo para a segurança operacional e longevidade da usina.

ABSTRACT

The Permanent Preservation Areas (PPAs) of the reservoirs of the Belo Monte Hydroelectric Power Plant cover approximately 26,000 hectares and play a strategic role beyond their ecological function under the Brazilian Forest Code. Their integrity is directly linked to the safety of hydraulic structures, as anthropogenic disturbances—such as wildfires, irregular occupation, vegetation clearing, and cattle presence—may compromise environmental and operational stability. In this context, the Environmental and Socio-Patrimonial Management Program (PGASP), implemented by Norte Energia, adopts a continuous monitoring and surveillance approach supported by technologies such as Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). This study presents the protection measures implemented and analyzes the results obtained in 2025. A total of 80 irregularity events were recorded, predominantly wildfires and irregular occupations, indicating significant anthropogenic pressure on PPAs. Additionally, more than 20 km of fencing and signage were installed, alongside environmental education initiatives reaching over 1,000 participants. The findings highlight that integrating technology, territorial management, and social engagement is essential for maintaining PPAs and ensuring the operational safety and longevity of hydropower facilities.

1. INTRODUÇÃO

A gestão ambiental de empreendimentos hidrelétricos na Amazônia demanda abordagens integradas que considerem não apenas os aspectos ecológicos, mas também as dimensões sociais, territoriais e operacionais. Nesse contexto, as Áreas de Preservação Permanente (APP) associadas aos reservatórios assumem papel central na manutenção da integridade ambiental e da segurança das estruturas hidráulicas.

As APPs exercem papel fundamental na proteção dos recursos hídricos, estabilidade de margens e manutenção da biodiversidade, conforme estabelecido no Código Florestal Brasileiro **[1]**. Em empreendimentos hidrelétricos, essas áreas também atuam como zonas de amortecimento, contribuindo para a segurança física das estruturas.

A Usina Hidrelétrica Belo Monte, localizada no estado do Pará, possui mais de 26 mil hectares de área de APP distribuída às margens de seus reservatórios, estando sujeita a pressões antrópicas diversas.

Nesse cenário, o Programa de Gestão Ambiental e Sociopatrimonial (PGASP) foi estruturado com o objetivo de promover a vigilância, monitoramento e controle dessas áreas, integrando tecnologia, vigilância patrimonial, sensibilização social, sinalização e articulação institucional **[2]**.

Este artigo tem como objetivo apresentar as medidas de proteção adotadas pelo programa, bem como analisar seus resultados a partir dos dados consolidados de 2025, relacionando a gestão ambiental das APPs à segurança operacional.

2. ABORDAGEM METODOLÓGICA

O programa atua sobre uma área de aproximadamente 87,9 mil hectares, sendo destes, 26,4 mil hectares de APPs, na qual são implementadas medidas de proteção por meio da integração das seguintes ações:

- Monitoramento e vigilância patrimonial com o apoio de tecnologia;
- Sinalização (cercamento e instalação de placas), educação ambiental e comunicação social;
- Gestão e tratamento de ocorrências.

2.1 Monitoramento e vigilância patrimonial com o apoio de tecnologia

A vigilância patrimonial é realizada por meio de rondas terrestres e fluviais, sobrevoos com drones (RPAS) e registro georreferenciado das ocorrências. O monitoramento territorial adotado pelo PGASP baseia-se na integração de diferentes escalas de observação, combinando inspeções de campo com tecnologias. Essa abordagem permite a construção de uma base histórica consistente, fundamental para análise de tendências e definição de áreas prioritárias.

O uso de aeronaves remotamente pilotadas (VANTS/RPAS) tem se consolidado como ferramenta eficiente para monitoramento ambiental, permitindo maior cobertura espacial e registros de irregularidades em áreas de difícil acesso **[3]**.

2.2 Sinalização, educação ambiental e comunicação social

As ações de sinalização referem-se ao cercamento e instalação de placas de advertência e sinalização em trechos estratégicos, nas áreas identificadas com pressão antrópica sobre a APP, priorizando os pontos onde se observa o acesso de gado das propriedades lindeiras à área protegida, como medida de proteção.

A educação ambiental e a comunicação social são desenvolvidas por meio da adoção de estratégias diversificadas, contemplando diferentes metodologias e linguagens, com o objetivo de ampliar o alcance das ações junto aos públicos do entorno das APPs. As atividades são estruturadas de modo a considerar os saberes locais e as especificidades socioculturais do território, possibilitando a abordagem de diferentes perfis de público e contextos sociais **[2]**.

Destaca-se a atuação da educação ambiental no processo de cercamento da APP junto às famílias lindeiras, para uma abordagem preventiva e participativa na gestão socioambiental.

2.3 Gestão e tratamento de ocorrências

Em decorrência das ações de monitoramento patrimonial rotineiro, são realizados os tratamentos de cada ocorrência, conforme sua especificidade, visando a comunicação aos órgãos competentes.

Para isso, são elaborados essencialmente o registro de ocorrência, o boletim de ocorrência policial, a notificação extrajudicial (quando identificado o suposto autor) e a correspondência aos órgãos ambientais. Em alguns casos, são elaborados mapas de situação/localização.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No ano de 2025, foram registradas 80 ocorrências ambientais, sendo as principais tipologias: queimadas, ocupações irregulares, presença de gado, abertura de acessos e extração de madeira, como mostra a figura 1.

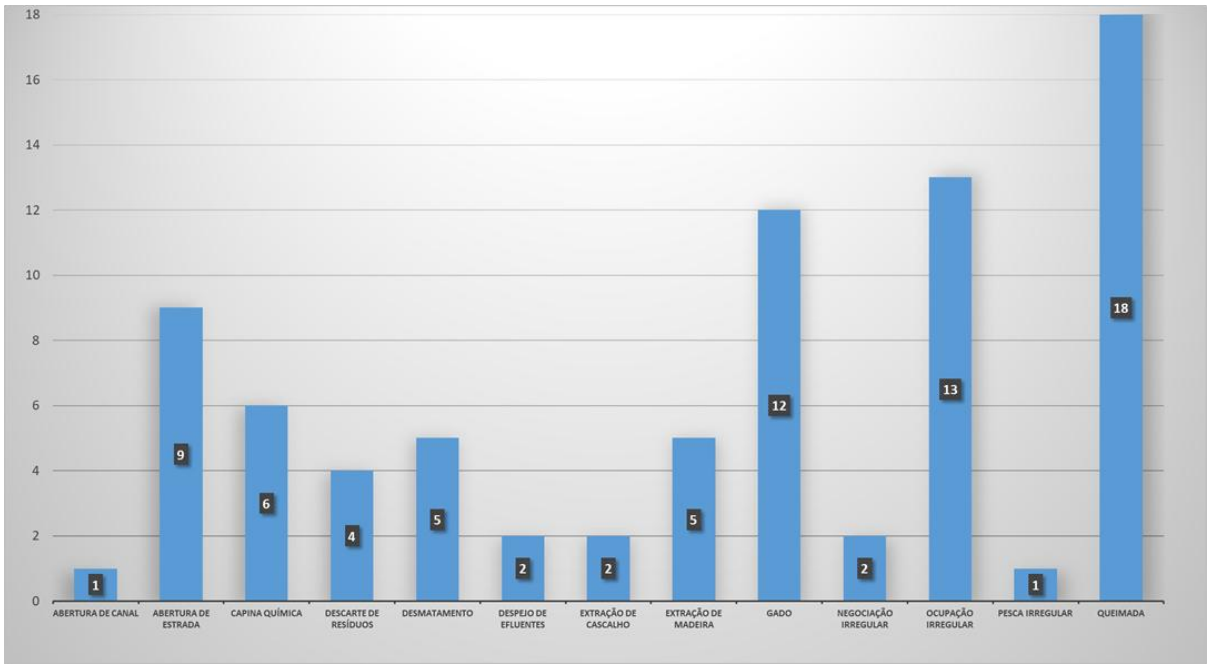


Figura 1 – Tipos e quantitativos de ocorrências, no ano de 2025.

As queimadas se destacam como principal tipologia de ocorrência, associadas ao uso do fogo como prática agrícola e à intensificação desse fenômeno durante o período seco na Amazônia **[4]**, bem como a queima irregular de resíduos sólidos na zona urbana, atingindo a APP.

Observou-se o aumento de registros em relação ao ano anterior (2024 = 50 ocorrências), indicando reflexo do aprimoramento da capacidade de detecção.

A maior concentração dos registros ocorreu nas margens do Reservatório Xingu, evidenciando a necessidade de priorização dessas áreas no monitoramento, conforme mostra a figura 2.

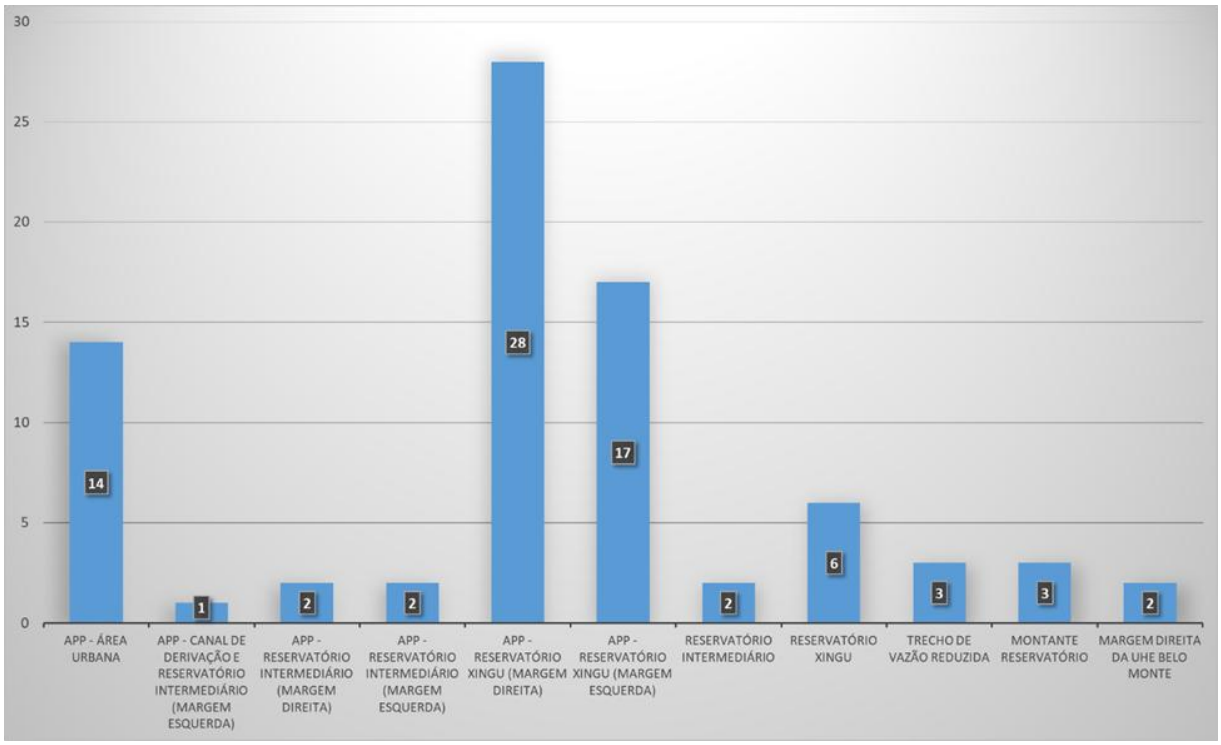


Figura 2 – Macrorregião com quantitativos das ocorrências, no ano de 2025.

Nas margens direita e esquerda do Reservatório Xingu (RX), naturalmente há maior pressão antrópica devido ao acesso por vias terrestres e desenvolvimentos de ações de agricultura e agropecuária pelos lindeiros. Contudo, na APP do Reservatório Intermediário (RI), onde se localiza os diques, barragens e a casa de força, estrutura principal da UHE Belo Monte, poucas ocorrências têm sido registradas.

Neste sentido, a efetiva gestão dessas áreas reduz os riscos de instabilidade de margens, minimiza intervenções irregulares e protege a infraestrutura do empreendimento, estando diretamente relacionada à segurança operacional da usina. Portanto, a degradação da APP não é apenas um problema ambiental, mas também se caracteriza um vetor indireto de risco operacional.

A gestão das APPs deve ser compreendida como componente estratégico da segurança operacional de empreendimentos hidrelétricos, em consonância com as diretrizes da Política Nacional de Segurança de Barragens **[5]**.

No que se refere ao total de ocorrências, uma parcela (08) foi solucionada diretamente em campo, sendo a maioria dependente da atuação de órgãos fiscalizadores (72).

Esse cenário evidencia que, embora o monitoramento seja eficiente, a efetividade das ações repressivas depende da atuação integrada com instituições com poder de polícia.

Como medidas preventivas e de mitigação, foram implantados mais de 20 mil metros de cercamento na APP em 2025, totalizando atualmente mais de 45 mil metros de cercas instaladas ao longo de toda sua extensão. Também foram instaladas placas de advertência e sinalização, tendo sido mapeado mais de 30 placas distribuídas em pontos de maior interferência antrópica, em toda área protegida.



Figura 3 – Cercamento da APP da UHE Belo Monte.



Figura 4 – Instalação de placa na APP da UHE Belo Monte.

Nesse contexto, as atividades de cercamento e instalação de placas de sinalização nas Áreas de Preservação Permanente (APP) constituem medidas estruturantes de ordenamento territorial e prevenção de intervenções irregulares. O cercamento físico atua como barreira de controle de acesso, especialmente em trechos sujeitos a atividade antrópica, como entrada de gado, abertura de trilhas e ocupações irregulares.

A sinalização exerce função informativa e educativa, ao delimitar a área protegida e comunicar as restrições de uso, contribuindo para a sensibilização dos usuários e proprietários lindeiros. A atuação conjunta dessas medidas tende a favorecer a redução de recorrência de ocorrências, reforçar a proteção da vegetação e auxiliar na manutenção das condições ambientais necessárias à estabilidade das margens e à integridade do entorno dos reservatórios.

No contexto do Projeto de Educação Ambiental (PEA) da UHE Belo Monte, foram realizadas atividades socioeducativas porta a porta nas áreas marginais dos Reservatórios Xingu (RX) e Intermediário (RI), abordando temas sobre a importância das APPs na proteção e manutenção da biodiversidade, além das medidas que devem ser adotadas para sua preservação. Em 2025, foram executados 04 projetos, 10 campanhas, 15 exposições, 181 materiais educativos distribuídos, 11 oficinas e 11 palestras, conforme apresenta a tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Temas das atividades realizadas pela Educação Ambiental, em 2025.

Atividades	Temas
Projetos	Semear Saberes; Entre Olhares, Memória e Permanência; Mãos que Transformam; Floresta + Xingu.
Campanhas	Amigos da APP; Nossa Praia Sempre Limpa; e Defeso.
Exposições	Oficinas Sustentáveis; Um Olhar Ribeirinho; Produtos Florestais; Fauna e Flora.

Atividades	Temas
Materiais educativos	Calendário Ambiental; Combate à Poluição por Agrotóxico; Importância dos Saberes Tradicionais na Preservação Ambiental; Dengue; APP e Queimadas.
Oficinas	Retrato da Água - Insetos Aquáticos em Cores; Pintura em Tecido; Reaproveitamento de Garrafas de Vidro com Barbantes e Ecojóias.
Palestras	Cercamento da APP; Princípios da Agrossilvicultura; Fixação Biológica de Nitrogênio; e Fim da Poluição Plástica.

Destaca-se que, na atividade de cercamento da APP, a educação ambiental atuou diretamente com 66 proprietários remanescentes, lindeiros à área protegida. Nas ações de Educação Ambiental realizadas no entorno da APP dos reservatórios (RX e RI) participaram de 1.296 pessoas nas atividades.

Esse quantitativo de pessoas, evidencia a adesão da população às ações propostas, refletindo o envolvimento das comunidades ribeirinhas e citadinas nas temáticas relacionadas à conservação ambiental, contribuindo para o fortalecimento da percepção ambiental e disseminação de práticas sustentáveis no cotidiano das comunidades **[2]**.

Nesse contexto, ações de educação ambiental, desempenham papel relevante na redução de conflitos e na promoção da conservação das áreas protegidas **[6]**.

Ressalta-se que essas ações apresentam resultados predominantemente de médio a longo prazo, considerando que promovem transformações comportamentais e culturais progressivas, cujos efeitos tendem a se perpetuar entre as gerações.

4. CONCLUSÕES

O Programa de Gestão Ambiental e Sociopatrimonial (PGASP) tem se consolidado como instrumento estratégico para a gestão territorial das APPs da UHE Belo Monte, integrando monitoramento tecnológico, ações preventivas e articulação institucional.

Os resultados de 2025 mostram avanços no aprimoramento do sistema de monitoramento, com aumento da capacidade de detecção das intervenções.

Destaca-se ainda, que a efetividade do programa depende não apenas das ações do empreendedor, mas da atuação integrada dos órgãos de fiscalização ambiental no território.

Por fim, a integração entre tecnologia, gestão territorial e sensibilização social demonstra-se como ferramenta essencial para a manutenção das APPs, contribuindo para a segurança operacional, sustentabilidade e longevidade da UHE Belo Monte.

5. PALAVRAS-CHAVE

Área de Preservação Permanente; Vigilância Patrimonial; Segurança Operacional; Ocorrências; Gestão Ambiental.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BRASIL (2012) – “Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 – Código Florestal Brasileiro”, Brasília, Brasil.

[2] NORTE ENERGIA S.A. (2026) – “26º Relatório Consolidado do Programa de Gestão Ambiental e Sociopatrimonial (PGASP)”, Altamira, Brasil.

[3] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2018) – “Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) no monitoramento ambiental”, Brasília, Brasil.

[4] FEARNSIDE, P.M. (2015) – “Impactos de hidrelétricas na Amazônia”, Revista Ciência Hoje, Brasil.

[5] Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2020) – “Relatório de Segurança de Barragens”, Brasília, Brasil.

[6] VALENTI, M.W. et al. (2018) – “Educação ambiental em unidades de conservação”, Revista Educação em Revista, Brasil.

	**Gilvania SANTOS KÜLL** Engenheira Ambiental (UEPA) e trabalha como Analista Socioambiental na Norte Energia, atuando no Programa de Gestão Ambiental e Sociopatrimonial (PGASP) da UHE Belo Monte. Possui experiência em licenciamento e supervisão ambiental, monitoramento de Áreas de Preservação Permanente, fiscalização ambiental, elaboração de documentos técnicos e interface com órgãos ambientais.
	**José Maria MARTINS DO NASCIMENTO JÚNIOR** Engenheiro Florestal (UFPR), especialista em Recuperação de áreas degradadas (UFV). Atua na UHE Belo Monte (Norte Energia) com gestão de contratos de PRAD na Amazônia. Experiência em restauração (>2400 ha), com foco em planejamento e avaliação de desempenho por indicadores estruturais e funcionais.

	**Pedro Henrique CORDEIRO DOS SANTOS ALVES** Engenheiro Florestal com mais de 8 anos de experiência em monitoramentos ambientais, estudos de flora e gestão de projetos socioambientais na Amazônia. Atuação em análises ecológicas, monitoramento da biodiversidade, recuperação de áreas degradadas e acompanhamento de condicionantes ambientais, aliando conhecimento técnico, visão estratégica e compromisso com a conservação ambiental e o desenvolvimento sustentável.
	**Roberto LEANDRO DA SILVA** Biólogo e mestre em ecologia e produção sustentável. Tem mais de 20 anos de experiência na gestão e execução de monitoramentos socioambientais em projetos estruturantes no setor elétrico. Trabalha na Norte Energia desde o ano de 2013 e atualmente ocupa o cargo de Gerente de Meios Físico e Biótico, diretamente ligado ao desenvolvimento de mais de 40 projetos de monitoramento e mitigação, em atendimento às condicionantes do licenciamento ambiental da UHE Belo Monte.
	**Bruno GONÇALVES BAHIANA** Engenheiro Agrícola e Ambiental pela UFF, com pós-graduação em MBA em Petróleo, Gás e Energia (UVA) e em Antropologia (Unyleya). Mestre em Biodiversidade e Conservação (UFPA). Possui formação complementar pelo MIT, Harvard e FGV, e atua há mais de 15 anos no gerenciamento, avaliação e monitoramento de projetos socioeconômicos e ambientais no setor de energia. Atualmente, é Superintendente Socioambiental e do Componente Indígena da Norte Energia.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

GESTÃO DE RISCO EM SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA ENCHENTES COM DIQUES

Rogério de Abreu MENESCAL
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico - ANA

Regina Cera CADORE
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico - ANA

Carolina Piana SERPA
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico - ANA

Márcio Bomfim Pereira PINTO
Especialista em Geoprocessamento - ANA

Aline Cristina Leal COSTA
Engenheira Civil - ANA

Alan Vaz Lopes
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico - ANA

RESUMO

O artigo analisa aspectos da governança da segurança de sistemas de proteção contra cheias, compostos por diques e estruturas complementares, sob a ótica da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Tais sistemas constituem infraestruturas críticas destinadas à proteção da sociedade frente a eventos hidrológicos extremos, porém sua efetividade depende da gestão contínua da segurança ao longo do tempo. Como referência empírica, utiliza-se o sistema de proteção contra cheias da Região Metropolitana de Porto Alegre, formado por diques, comportas, estações de bombeamento, canais e polders. Durante os eventos de cheia de 2024, o sistema apresentou falhas graves, não cumprindo adequadamente sua função de proteção e contribuindo para a magnitude dos danos observados. A análise evidencia que essas falhas estão associadas a fragilidades de governança, incluindo indefinições de responsabilidade, deficiências de manutenção e ausência de planejamento sistemático da segurança. Situação semelhante já havia sido observada historicamente no setor de barragens no Brasil, antes da instituição da PNSB. Embora essa política não explicite sua aplicação aos sistemas de diques, seus princípios oferecem um referencial conceitual relevante para a discussão da governança dessas infraestruturas, assim como barragens. O artigo conclui pela necessidade de fortalecimento institucional, inspirado nos fundamentos da PNSB e nas boas práticas internacionais, para assegurar a gestão preventiva da segurança dos sistemas de proteção contra cheias.

ABSTRACT

This paper analyzes aspects of the governance of flood protection systems composed of levees and complementary structures, from the perspective of the Brazilian National Dam Safety Policy (PNSB). These systems constitute critical infrastructures intended to protect society against extreme hydrological events; however, their effectiveness depends on the continuous management of safety over time. The flood protection system of the Porto Alegre Metropolitan Region is used as an empirical reference. This system is composed of levees, floodgates, pumping stations, channels, and polders. During the 2024 flood events, the system exhibited severe failures, failing to adequately fulfill its protective function and contributing to the magnitude of the observed damages. The analysis shows that these failures are associated with governance shortcomings, including unclear responsibilities, maintenance deficiencies, and the absence of systematic safety planning. A similar situation had previously been observed in the Brazilian dam sector prior to the establishment of the PNSB. Although levees systems are not expressly mentioned in the policy, its principles provide a relevant conceptual framework for discussing the governance of these water-retaining infrastructures, as well as dams. The paper concludes by emphasizing the need for institutional strengthening, inspired by the foundations of the PNSB and by international best practices, to ensure the preventive management of the safety of flood protection systems.

1. INTRODUÇÃO

Os eventos hidrológicos extremos têm se intensificado nas últimas décadas, ampliando os desafios associados à gestão de riscos de cheias em áreas urbanas e periurbanas. Nesse contexto, os sistemas de proteção contra cheias, compostos por diques e um conjunto de estruturas complementares, constituem infraestruturas essenciais para a redução de danos e a proteção da população. Entretanto, a presença dessas estruturas não elimina o risco associado às inundações, sendo sua efetividade fortemente condicionada à forma como são concebidas, operadas, mantidas e, sobretudo, geridas ao longo do tempo [1].

Internacionalmente, a literatura técnica reconhece que sistemas de diques devem ser compreendidos como infraestruturas complexas, cujo desempenho depende do funcionamento integrado de múltiplos componentes físicos e operacionais, bem como de arranjos institucionais adequados. Estudos sobre falhas e desempenho de diques demonstram que eventos de ruptura ou mau funcionamento raramente decorrem de causas isoladas, estando geralmente associados a deficiências acumuladas de manutenção, lacunas de informação, falhas operacionais e indefinições de responsabilidade [2]. Assim, a segurança desses sistemas ultrapassa o domínio estritamente técnico-estrutural e se insere no campo da governança da gestão do risco.

No Brasil, os sistemas de proteção contra cheias têm sido historicamente implantados como respostas a eventos críticos, muitas vezes sem a consolidação de um arcabouço institucional que assegure sua gestão sustentável. Observa-se que diversos desses sistemas foram construídos ao longo do século XX, notadamente pelo então Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), extinto na década

de 1990. Desde então, muitos desses empreendimentos passaram a operar sem definições claras quanto à titularidade, à operação e à manutenção, resultando em um quadro de fragilização progressiva da segurança das estruturas.

Os eventos de cheia ocorridos em 2024 na Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPOA) evidenciaram de forma contundente essas fragilidades. O sistema de proteção contra cheias da região, concebido como uma barreira física integrada por diques, comportas, estações de bombeamento, canais e polders, não cumpriu adequadamente sua função de proteção durante o evento extremo, apresentando falhas graves em diferentes pontos e componentes [3]. Embora a complexidade do evento hidrológico tenha sido um fator relevante, a magnitude dos danos e prejuízos observados está diretamente associada a problemas de governança do sistema, incluindo deficiências de manutenção, operação e coordenação institucional.

Situação semelhante já havia sido identificada anteriormente no setor de barragens no Brasil. Até o início da década de 2010, a gestão da segurança dessas estruturas era marcada por lacunas normativas, responsabilidades difusas e baixa priorização da prevenção. Esse cenário motivou a instituição da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), por meio da Lei nº 12.334/2010 [4], que estabeleceu um arcabouço técnico, jurídico e institucional voltado à gestão sistemática da segurança das barragens, introduzindo princípios como a responsabilização do empreendedor, a abordagem preventiva e a consideração explícita das consequências de falha.

Ainda que a PNSB tenha sido concebida para barragens destinadas à acumulação de água, rejeitos de mineração ou resíduos industriais, seus fundamentos conceituais dialogam diretamente com as recomendações internacionais para a gestão da segurança de sistemas de diques. A adoção de abordagens baseadas em risco, o reconhecimento da importância do dano potencial associado e a centralidade da governança institucional são elementos comuns tanto à política brasileira quanto às boas práticas internacionais voltadas à segurança de infraestruturas de proteção contra cheias.

Nesse sentido, a análise da governança dos sistemas de diques à luz da PNSB revela-se particularmente relevante. O caso da RMPOA oferece uma referência empírica concreta para discutir como a ausência de um modelo estruturado de gestão da segurança pode comprometer a função primordial dessas infraestruturas, mesmo quando as estruturas físicas ainda existem. Além disso, levantamentos preliminares indicam a existência de diversos sistemas semelhantes distribuídos pelo território nacional, o que amplia a relevância do tema para além do caso específico analisado (Tabela 1).

O presente artigo tem como objetivo analisar aspectos da governança dos sistemas de proteção contra cheias no Brasil, utilizando o sistema de diques da Região Metropolitana de Porto Alegre como estudo de referência e tomando a Política Nacional de Segurança de Barragens como marco conceitual para a discussão. Busca-se identificar pontos críticos, limites e potencialidades da aplicação dos princípios da PNSB a esses sistemas, bem como apontar encaminhamentos institucionais e técnicos que contribuam para o fortalecimento da segurança dessas infraestruturas e para a proteção da sociedade frente a eventos hidrológicos extremos.

Tabela 1 - Levantamento preliminar dos sistemas de diques em território nacional.

Localização	Estado	Curso d'água associado	Extensão (km)
Porto Real do Colégio	AL	Rio São Francisco	
Bom Jesus da Lapa	BA	Rio São Francisco	
Ibotirama	BA	Rio São Francisco	5,0
Aracati	CE	Rio Jaguaribe	5,0
São Francisco	MG	Rio São Francisco	1,6
Porto Murtinho	MS	Rio Paraguai	9,7
Teresina	PI	Rio Parnaíba e Rio Poti	8,3
Campos dos Goytacazes	RJ	Rio Muriaé e Rio Paraíba do Sul	1,5
Jucurutu	RN	Piranhas	
Porto Alegre	RS	Lago Guaíba e afluentes	68,0
São Leopoldo	RS	Rio dos Sinos	
Canoas	RS	Arroios e ligação com o Delta do Jacuí	28,2
Pelotas	RS	Canal São Gonçalo / Lagoa dos Patos	
Blumenau	SC	Ribeirões e Rio Itajaí-Açu	10,0
Franco da Rocha	SP	Rio Juqueri e Ribeirão Eusébio	2,6
São Paulo	SP	Rio Tietê	
Vale do Paraíba	SP	Paraíba do Sul e afluentes	97,7
Mairiporã	SP	Rio Juqueri	
Total (km)			**237,6**

2. GOVERNANÇA E SEGURANÇA

2.1 Sistemas de proteção contra cheias como infraestrutura integrada

Os sistemas de proteção contra cheias são concebidos com a finalidade de reduzir a probabilidade e as consequências de inundações em áreas vulneráveis, especialmente em regiões urbanas densamente ocupadas. Diferentemente de estruturas isoladas, como reservatórios ou obras pontuais de drenagem, esses sistemas configuram-se como infraestruturas integradas, compostas por múltiplos elementos físicos e operacionais que atuam de forma conjunta para conter, controlar ou desviar o escoamento durante eventos hidrológicos extremos [2].

Em geral, os sistemas de proteção contra cheias incluem diques marginais, comportas, estações de bombeamento, canais, polders e estruturas auxiliares, cuja funcionalidade depende da integração entre projeto, operação e manutenção. O desempenho do sistema como um todo não corresponde simplesmente à soma das capacidades individuais de cada componente, mas sim à sua atuação coordenada, particularmente durante eventos de cheia, quando decisões operacionais assumem papel central.

A literatura técnica internacional destaca que a segurança desses sistemas deve ser avaliada sob uma perspectiva sistêmica, considerando não apenas os mecanismos estruturais de falha, mas também aspectos operacionais, organizacionais e institucionais. Nesse sentido, falhas localizadas podem desencadear consequências em cascata, comprometendo a função global de proteção mesmo quando grande parte das estruturas permanece fisicamente íntegra [2,5].

Além disso, sistemas de proteção contra cheias são projetados para operar dentro de determinadas faixas de evento hidrológico, assumindo implicitamente a existência de risco residual. A eficácia desses sistemas está, portanto, intrinsecamente associada à capacidade institucional de reconhecer, gerir e comunicar esse risco residual à sociedade, evitando a falsa percepção de proteção absoluta. Assim, a análise desses sistemas deve incorporar não apenas critérios hidráulicos e estruturais, mas também elementos de governança, planejamento e gestão do risco.

2.2 Governança e segurança dos sistemas de diques no contexto brasileiro

No Brasil, a implantação de sistemas de proteção contra cheias ocorreu, em grande medida, como resposta a eventos críticos, especialmente ao longo do século XX. Muitos desses empreendimentos foram concebidos e executados em um contexto histórico marcado por forte centralização administrativa e por uma visão predominantemente estrutural das soluções para o controle de cheias. Como resultado, a atenção frequentemente concentrou-se na implementação das obras físicas, com menor ênfase na definição de arranjos institucionais permanentes para sua operação e manutenção.

Esse histórico contribuiu para um cenário no qual diversos sistemas de diques operam atualmente sem uma governança claramente estabelecida. Observa-se, com frequência, a ausência de definição inequívoca quanto à titularidade das estruturas, à responsabilidade pela operação dos equipamentos e à alocação de recursos para manutenção e inspeção periódica. Em sistemas que abrangem múltiplos municípios ou entes federativos, essas indefinições tendem a ser agravadas, dificultando a coordenação e a tomada de decisão em situações de emergência.

A segurança dessas infraestruturas, nesse contexto, passa a depender de arranjos institucionais informais ou temporários, muitas vezes insuficientes para lidar com eventos hidrológicos extremos. A inexistência de rotinas sistemáticas de inspeção, de protocolos operacionais consolidados e de planejamento para cenários de falha compromete a capacidade do sistema de cumprir sua função primordial de proteção da sociedade.

Situação análoga foi observada historicamente no setor de barragens no Brasil, antes da instituição da Política Nacional de Segurança de Barragens. Nesse período, a ausência de um marco regulatório específico resultava em responsabilidades difusas, baixa priorização da prevenção e acúmulo de riscos ao longo do tempo. A experiência acumulada nesse setor evidencia que a segurança de infraestruturas hídricas não pode ser garantida apenas pela existência das estruturas físicas, exigindo governança clara, instrumentos de gestão e atuação contínua do poder público e dos responsáveis diretos.

2.3 O sistema de proteção contra cheias da Região Metropolitana de Porto Alegre

O sistema de proteção contra cheias da Região Metropolitana de Porto Alegre constitui um dos maiores e mais complexos do país, tendo sido concebido para proteger áreas urbanas localizadas às margens do Lago Guaíba e de seus principais afluentes. Sua função é conter o avanço das águas quando os níveis do corpo hídrico ultrapassam as cotas naturais das margens, reduzindo a exposição da população e das atividades econômicas a inundações.

Esse sistema é formado por um conjunto de estruturas interdependentes, incluindo diques marginais, comportas, estações de bombeamento, canais de drenagem e áreas de polder, distribuídos por diversos municípios da região metropolitana. O funcionamento adequado do sistema depende tanto da integridade física dessas estruturas quanto da operação coordenada dos equipamentos, especialmente durante eventos de cheia prolongada, quando o controle de níveis e a drenagem interna assumem papel crítico.

Durante os eventos extremos de cheia ocorridos em 2024, o sistema apresentou falhas em diferentes componentes, não cumprindo adequadamente sua função de proteção. Relatos técnicos e institucionais indicam a ocorrência de problemas associados a comportas, estações de bombeamento e trechos de diques, bem como dificuldades operacionais e de coordenação entre os responsáveis. Embora a magnitude do evento hidrológico tenha sido excepcional, as falhas observadas evidenciam vulnerabilidades acumuladas ao longo do tempo [10, 11].

Esses episódios revelaram que a degradação física das estruturas, a ausência de manutenção preventiva adequada e a falta de protocolos operacionais integrados contribuíram de forma significativa para o comprometimento do sistema. Mais do que falhas pontuais, o evento de 2024 expôs uma falha sistêmica, associada a fragilidades de governança, planejamento e gestão da segurança.

O caso da Região Metropolitana de Porto Alegre ilustra, de forma concreta, os riscos associados à existência de sistemas de proteção contra cheias desprovidos de um modelo estruturado de governança da segurança. Ao mesmo tempo, evidencia a relevância de utilizar esse sistema como referência empírica para a análise proposta neste trabalho, uma vez que suas características técnicas e institucionais são representativas de diversos outros sistemas semelhantes existentes no território nacional.

2.4 A Política Nacional de Segurança de Barragens como referência para sistemas de diques

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010, consolidou no Brasil um marco regulatório voltado à prevenção de acidentes e à mitigação de riscos associados a barragens. Ao estabelecer princípios, diretrizes, instrumentos e responsabilidades institucionais, a PNSB promoveu uma mudança de paradigma na gestão dessas estruturas, deslocando o enfoque exclusivamente estrutural para uma abordagem mais ampla, baseada na prevenção, na avaliação de riscos e na redução de danos potenciais. Embora seu texto legal cite as barragens destinadas à contenção ou acumulação de água, rejeitos de mineração ou resíduos industriais, os fundamentos conceituais da política oferecem referências relevantes para a discussão da governança da segurança de sistemas de proteção contra cheias, contemplando os diques e as estruturas complementares.

Os sistemas de diques, a exemplo das barragens, constituem infraestruturas críticas cuja falha pode resultar em perdas significativas de vidas humanas, impactos sociais e prejuízos econômicos expressivos. Além disso, eventos recentes, tanto no Brasil quanto no exterior, evidenciam que a existência dessas estruturas não elimina o risco associado às cheias, podendo, em determinadas circunstâncias, amplificar as consequências dos eventos hidrológicos extremos quando não são adequadamente

concebidas, operadas e mantidas. Nesse contexto, a PNSB pode ser compreendida como um marco regulatório e conceitual para um modelo estruturado de governança da segurança de diques no país.

2.4.1 Segurança, risco e governança em infraestruturas de proteção

A segurança de infraestruturas hídricas não se limita à integridade física das estruturas, mas envolve um conjunto de aspectos técnicos, operacionais, organizacionais e institucionais. A literatura internacional sobre diques e sistemas de proteção contra cheias reconhece que o desempenho dessas infraestruturas deve ser analisado a partir de uma perspectiva sistêmica, considerando os mecanismos de falha, as condições de carregamento hidrológico, os processos de deterioração ao longo do tempo e as consequências associadas a possíveis modos de ruptura ou mau funcionamento [6, 7].

Nesse sentido, documentos como o International Levee Handbook [5] e estudos comparativos sobre análise de risco em sistemas de diques enfatizam que o risco resulta da combinação entre a probabilidade de falha e as consequências associadas, sendo fortemente influenciado pela forma como os sistemas são geridos. A governança da segurança passa, assim, a ocupar papel central, uma vez que decisões relativas à operação, à manutenção, ao monitoramento e à resposta a eventos extremos são tão determinantes quanto as características de projeto das estruturas.

A PNSB incorpora esse entendimento ao estabelecer que a segurança das barragens deve ser tratada de forma contínua e integrada, abrangendo todo o seu ciclo de vida. Ao introduzir instrumentos voltados à avaliação sistemática do risco e do dano potencial associado, a política reconhece que a prevenção de acidentes depende não apenas de critérios técnicos de projeto, mas também de arranjos institucionais claros e de processos decisórios orientados pela gestão do risco [7, 8]. Essa concepção é plenamente compatível com os princípios internacionais aplicados à segurança de diques, que destacam a necessidade de integração entre engenharia, gestão e políticas públicas.

2.4.2 Princípios e instrumentos da PNSB relevantes para sistemas de diques

Entre os principais aportes da PNSB está a definição explícita de responsabilidades, atribuindo ao empreendedor o dever de garantir a segurança da estrutura e ao poder público o papel de fiscalização e coordenação. No contexto das barragens, essa definição contribuiu para reduzir a fragmentação institucional e para estabelecer rotinas mínimas de inspeção, monitoramento e manutenção. No caso dos sistemas de diques, observa-se historicamente um cenário distinto, marcado por indefinições quanto à titularidade das estruturas, à responsabilidade pela operação e à alocação de recursos para manutenção, sobretudo em sistemas implantados há décadas e que atravessam múltiplos municípios.

Outro princípio central da PNSB é a adoção de uma abordagem preventiva, materializada na exigência de instrumentos como o plano de segurança da barragem, as revisões periódicas de segurança e os planos de ação de emergência. Embora esses instrumentos tenham sido concebidos para barragens, sua lógica é compatível com as recomendações internacionais para a gestão de sistemas de diques, que

enfatizam a importância do planejamento antecipado, da definição de procedimentos operacionais e da preparação para situações de falha ou sobrecarga hidráulica.

A classificação das estruturas quanto ao dano potencial associado (DPA) constitui outro elemento relevante [9]. Ainda que a metodologia específica da PNSB não seja diretamente aplicável aos diques, o conceito de priorização das ações de gestão com base nas consequências potenciais é amplamente adotado em análises internacionais de risco de sistemas de proteção contra cheias. Estudos comparativos indicam que, em muitos casos, as consequências da falha de diques em áreas urbanas densamente ocupadas são tão graves quanto aquelas associadas a barragens, reforçando a pertinência de incorporar essa lógica à governança desses sistemas [1].

2.4.3 Evidências internacionais sobre falhas sistêmicas em diques

Análises internacionais sobre falhas de diques, reunidas em bases de dados e estudos comparativos, mostram que os eventos de ruptura ou mau desempenho raramente decorrem de um único fator isolado. Em geral, as falhas resultam da combinação de múltiplos mecanismos, incluindo sobrecarga hidráulica, processos de erosão interna, degradação estrutural e falhas operacionais. Além disso, uma parcela significativa dos eventos registrados está associada a deficiências de manutenção, ausência de inspeções sistemáticas e inadequações na gestão institucional [2, 5, 7].

Essas evidências reforçam a compreensão de que os sistemas de proteção contra cheias devem ser tratados como sistemas complexos, nos quais a segurança depende do desempenho integrado de diversos componentes e da capacidade institucional de gerir o risco residual. Kiggeler et. al [7] destaca, nesse sentido, a importância de registros sistemáticos de desempenho e de falhas como instrumentos de aprendizado institucional, permitindo a identificação de padrões recorrentes e a melhoria contínua das práticas de gestão.

A PNSB, ao exigir a consolidação de informações técnicas e a sua disponibilização em sistemas nacionais de informação, introduziu no Brasil uma lógica semelhante no setor de barragens. A ausência de mecanismos análogos para os sistemas de diques limita a capacidade de aprendizado a partir de eventos passados e dificulta a adoção de uma abordagem preventiva mais consistente. O caso da Região Metropolitana de Porto Alegre ilustra essa fragilidade, na medida em que falhas observadas durante os eventos de cheia de 2024 revelaram a inexistência de registros consolidados, planos operacionais integrados e protocolos claros de atuação.

2.4.4 Limites da aplicação direta da PNSB a sistemas de diques

Apesar das convergências conceituais, há algumas diferenças para a aplicação direta da PNSB aos sistemas de diques. Uma diferença fundamental reside na função dessas estruturas: enquanto as barragens visam ao armazenamento permanente de água ou rejeitos, os diques atuam como estruturas de contenção temporária, sendo submetidos a esforços significativos apenas durante eventos de cheia. Essa característica influencia tanto os modos de falha quanto as estratégias de gestão da segurança.

Adicionalmente, os sistemas de proteção contra cheias são, via de regra, compostos por múltiplas estruturas interdependentes, cuja operação envolve tomadas de decisão em tempo real, especialmente no manuseio de comportas e no acionamento de

estações de bombeamento. Essa dimensão operacional é particularmente crítica e nem sempre encontra correspondência direta nos instrumentos previstos na PNSB para barragens. Ademais, a presença de múltiplos entes federativos e órgãos setoriais exige arranjos de governança mais complexos do que aqueles normalmente associados a uma barragem individual.

Essas limitações indicam que a simples extensão do arcabouço legal da PNSB aos diques, sem adaptações, pode não ser suficiente para enfrentar os desafios específicos desses sistemas. Torna-se necessário, portanto, interpretar a política como um referencial conceitual e institucional, e não como um modelo a ser transposto de forma automática.

2.4.5 A PNSB como marco regulatório para a governança da segurança de diques

A trajetória da segurança de barragens no Brasil antes da PNSB é marcada por um conjunto de fragilidades institucionais semelhantes àquelas atualmente observadas nos sistemas de proteção contra cheias: inexistência de cadastros consolidados, ausência de rotinas formais de inspeção, responsabilidades difusas e baixa priorização da manutenção preventiva. A implementação da PNSB representou uma resposta a esse cenário, ao estruturar um arcabouço normativo voltado à gestão sistemática do risco.

Os eventos de cheia de 2024 na Região Metropolitana de Porto Alegre evidenciam que os sistemas de diques no Brasil se encontram, em muitos aspectos, em um estágio análogo ao das barragens no período pré-PNSB. A análise comparativa sugere que os fundamentos da política — tais como a responsabilização, a abordagem preventiva e a consideração explícita das consequências — podem orientar a construção de um modelo específico de governança da segurança de diques, adaptado às suas particularidades técnicas e institucionais.

Dessa forma, mais do que defender a pertinência da ampliação do escopo legal da PNSB, este trabalho aponta para a necessidade de utilizar seus princípios como referência para o desenvolvimento de instrumentos normativos e arranjos institucionais próprios, capazes de assegurar a gestão contínua da segurança dos sistemas de proteção contra cheias. Tal perspectiva contribui para reduzir o risco de falhas sistêmicas e para fortalecer a capacidade do Estado e da sociedade de enfrentar eventos hidrológicos extremos em um contexto de crescente variabilidade climática.

2.5 Encaminhamentos para a governança da segurança de sistemas de proteção contra cheias

A análise dos sistemas de proteção contra cheias sob a ótica da governança da segurança evidencia a necessidade de avanços institucionais e técnicos que ultrapassam intervenções pontuais ou respostas emergenciais a eventos extremos. A experiência da Região Metropolitana de Porto Alegre demonstra que a mera existência de diques e estruturas associadas não é suficiente para garantir a proteção da sociedade, sendo imprescindível a consolidação de um modelo de gestão contínua da segurança desses sistemas.

Um primeiro encaminhamento refere-se à identificação, ao cadastramento e à caracterização sistemática dos sistemas de proteção contra cheias existentes no

território nacional. A ausência de um inventário consolidado inviabiliza qualquer estratégia de priorização de ações, de alocação de recursos e de acompanhamento do desempenho dessas infraestruturas. Tal iniciativa permitiria, ainda, identificar sistemas com elevado potencial de dano associado, orientando a adoção de medidas preventivas proporcionais às consequências de uma eventual falha.

Outro aspecto central diz respeito à definição clara de responsabilidades institucionais. Sistemas de diques que se estendem por múltiplos municípios ou envolvem diferentes entes federativos demandam arranjos de governança específicos, capazes de assegurar coordenação operacional, compartilhamento de informações e tomada de decisão integrada, especialmente durante eventos de cheia. A indefinição quanto à titularidade e à operação das estruturas constitui um dos principais fatores de vulnerabilidade observados, comprometendo a implementação de rotinas de inspeção, manutenção e operação adequada.

Adicionalmente, torna-se necessário incorporar de forma sistemática a abordagem baseada em risco na gestão desses sistemas. A consideração explícita das consequências potenciais de falha, ainda que por meio de metodologias adaptadas às especificidades dos diques, é fundamental para orientar a priorização de investimentos e ações de segurança. Essa perspectiva permite reconhecer o risco residual inerente aos sistemas de proteção contra cheias e reforça a importância da transparência e da comunicação com a sociedade sobre os limites da proteção oferecida.

No campo normativo, a análise desenvolvida neste trabalho aponta que a Política Nacional de Segurança de Barragens pode ser utilizada como um importante referencial conceitual e institucional, ainda que não se aplique automaticamente aos sistemas de diques. Seus princípios — como a responsabilização, a prevenção, o planejamento da segurança e a centralidade da proteção da vida humana — oferecem base sólida para a construção de um modelo específico de governança da segurança de sistemas de proteção contra cheias, adaptado às suas características técnicas e institucionais.

Por fim, destaca-se a necessidade de transição de uma abordagem reativa para uma abordagem preventiva na gestão dessas infraestruturas. A experiência brasileira recente demonstra que eventos hidrológicos extremos tendem a expor fragilidades acumuladas ao longo do tempo, frequentemente associadas à ausência de manutenção sistemática e de planejamento. O fortalecimento da governança da segurança dos sistemas de diques constitui, portanto, elemento estratégico para a redução de riscos, a mitigação de danos e a proteção efetiva da sociedade frente a cenários de crescente variabilidade hidrológica.

3. CONCLUSÕES

A análise desenvolvida neste artigo evidencia que os sistemas de proteção contra cheias, compostos por diques e estruturas complementares, constituem infraestruturas críticas para a proteção da sociedade frente a eventos hidrológicos extremos, especialmente em áreas urbanas densamente ocupadas. No entanto, demonstrou-se que a efetividade desses sistemas não depende exclusivamente da

existência física das estruturas, mas fundamentalmente da forma como sua segurança é governada ao longo do tempo.

O caso do sistema de proteção contra cheias da Região Metropolitana de Porto Alegre ilustra de maneira clara as consequências da ausência de um modelo estruturado de governança da segurança. As falhas observadas durante os eventos de cheia de 2024 não podem ser atribuídas apenas à magnitude do evento hidrológico, mas refletem um conjunto de fragilidades institucionais, operacionais e de manutenção acumuladas ao longo dos anos. Trata-se, portanto, de uma falha sistêmica, na qual a degradação das estruturas físicas se combina com lacunas de coordenação, planejamento e definição de responsabilidades.

A comparação com a trajetória do setor de barragens no Brasil reforça esse diagnóstico. Antes da instituição da Política Nacional de Segurança de Barragens, a gestão da segurança dessas estruturas, em um panorama geral, era igualmente marcada por responsabilidades difusas, baixa priorização da prevenção e atuação predominantemente reativa. A implementação da PNSB representou um avanço significativo ao consolidar princípios como a responsabilização, a abordagem preventiva, a consideração explícita das consequências potenciais de falha e a transparência de informações, promovendo uma mudança de paradigma na gestão do risco.

Embora a PNSB não tenha explicitado abranger os sistemas de diques, seus fundamentos conceituais mostram-se plenamente pertinentes para a discussão da governança da segurança dessas infraestruturas. A literatura técnica internacional e o caso empírico analisado indicam que os riscos associados aos sistemas de proteção contra cheias são comparáveis, em termos de funcionalidade e consequências, àqueles observados em barragens, sobretudo quando localizados em áreas urbanas. Nesse sentido, a política brasileira de segurança de barragens pode ser compreendida como um marco regulatório relevante, capaz de orientar a construção de um modelo específico de governança para os sistemas de diques.

Os encaminhamentos discutidos ao longo do artigo apontam para a necessidade de avanços institucionais que incluam a identificação e o cadastramento sistemático desses sistemas, a definição clara de responsabilidades, a incorporação de abordagens baseadas em risco e o fortalecimento da gestão preventiva da segurança. Tais medidas são fundamentais para evitar a recorrência de falhas sistêmicas e para reduzir a vulnerabilidade das áreas protegidas frente a eventos extremos cada vez mais frequentes.

Por fim, conclui-se que a segurança dos sistemas de proteção contra cheias deve ser incorporada de forma explícita à agenda pública de gestão de riscos hidrológicos no Brasil. A experiência recente demonstra que a ausência de governança da segurança pode converter infraestruturas concebidas para proteção em elementos de amplificação de danos. O fortalecimento institucional, inspirado nos princípios da Política Nacional de Segurança de Barragens e nas boas práticas internacionais, constitui passo essencial para assegurar que esses sistemas cumpram efetivamente sua função de proteção da sociedade.

4. PALAVRAS-CHAVE

Sistemas de proteção contra cheias, segurança de diques, governança, Política Nacional de Segurança de Barragens

5. RESSALVA INSTITUCIONAL

As opiniões, análises e interpretações apresentadas neste artigo são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es) e não representam a posição institucional da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE) (2024) – “Engineer Circular 1165-2-218: USACE Levee Safety Program”, relatório técnico / diretriz institucional, tema: segurança de diques, O&M e comunicação de risco, circular EC 1165-2-218, Washington, DC (EUA).

[2] CIRIA; CROW; USACE. (2013) – “The International Levee Handbook”, manual técnico internacional, tema: projeto, operação e gestão de diques, Londres, Reino Unido.

[3] MARQUES, G. F. (2024) – “A cheia de 2024 no estado do Rio Grande do Sul e as linhas de ação para a resiliência contra eventos extremos”, nota técnica (GESPLA/IPH–UFRGS), tema: governança, resiliência e manutenção/operabilidade de infraestrutura de proteção contra cheias (inclui descrição do sistema de Porto Alegre e menção a falhas por manutenção/operação), s/v, Porto Alegre–RS.

[4] BRASIL. (2010) – Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 – Política Nacional de Segurança de Barragens, Diário Oficial da União, legislação federal, Brasília, Brasil.

[5] VRIJLING, J. K.; VAN GELDER, P. H. A. J. M.; et al. (2007) – “The risk analysis of levee systems – a comparison of international best practices”, International Conference on Flood Risk Management, tema: análise de risco em sistemas de diques, anais da conferência, Delft, Países Baixos.

[6] ICOLD. (2022) – “Current state-of-practice in risk-informed decision-making for the safety of dams and levees”, ICOLD Bulletin 189, tema: gestão de risco e tomada de decisão, Paris, França.

[7] KIGGELER, J.; VRIJLING, J. K.; VAN GELDER, P. H. A. J. M. (2014) – “Towards an International Levee Performance Database”, International Conference on Flood Risk Management, tema: desempenho e falhas de diques, anais da conferência, Rotterdam, Países Baixos.

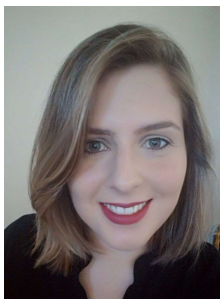
[8] ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (2023) – “Relatório de Segurança de Barragens no Brasil”, relatório técnico institucional, tema: segurança de barragens e governança, Brasília, Brasil.

[9] CNRH – CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. (2017) – “Resoluções do CNRH sobre a implementação da Política Nacional de Segurança de

Barragens", atos normativos institucionais, tema: governança da segurança, Brasília, Brasil.

[10] COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; POSSANTTI, I. B.; DORNELLES, F.; KOBIYAMA, M.; et al. (2025) – *O desastre hidrológico excepcional de abril–maio de 2024 no Sul do Brasil*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 30, Brasil. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbrh/a/pZSKfKmv5dmyBWZRhpLv5zF. Acesso em: 18/05/2026.

[11] DRRS – DUTCH RISK REDUCTION AND SURGE SUPPORT PROGRAM (RVO). (2024) – "Relatório Final – Porto Alegre, Brasil (Agosto de 2024)", relatório técnico (missão DRRS), tema: diagnóstico do evento e falhas do sistema de proteção (estações elevatórias/casas de bombas, comportas falhas/ausentes, transbordamentos/rompimentos localizados de diques e falhas de projeto), Porto Alegre–RS, Brasil.

	**Rogério de Abreu MENESCAL** Engenheiro Civil, Mestre em Geotecnia e Doutor em Recursos Hídricos. É Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. Atuou também nas áreas de recursos hídricos, obras hidráulicas, AHEs, transporte aquaviário e infraestrutura portuária.
	**Regina Cera CADORE** Engenheira Civil, Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. É Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. Atuou nas áreas de recursos hídricos no âmbito público, privado e docência no ensino superior.
	**Carolina Piana SERPA** Engenheira Civil, Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná – UFPR e pós-graduada em Gerenciamento de Projetos pela FGV. É Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, compondo a equipe de Segurança de Barragens da agência. Atuou também com projeto básico, executivo e planejamento de obras civis de edificações e AHEs.

	**Márcio Bomfim Pereira PINTO** Engenheiro Eletricista, Mestre em Geoprocessamento pela Universidade de Brasília, Especialista em Geoprocessamento na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA. Atualmente compõe a equipe de Segurança de Barragens da ANA sendo responsável pelo acompanhamento do Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens - SNISB e modelagem de rompimento de barragens.
	**Aline Cristina Leal COSTA** Engenheira Civil pela Universidade Federal de Brasília – Unb. Atuou como engenheira na Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil – Sedec no Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR). Atualmente, está lotada na Coordenação de Regulação de Segurança de Barragens na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.
	**Alan Vaz LOPES** Engenheiro Civil, Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Brasília – Unb e Doutor em Engenharia Civil e Ambiental pela UC Berkeley. É Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico na ANA. Atuou nas áreas de hidrologia, águas subterrâneas, abastecimento de água e esgotamento sanitário, aproveitamentos hidrelétricos, otimização e análise de sistemas hídricos, outorga, modelagem climática, gerenciamento de recursos hídricos e governança da água, fiscalização de usos de recursos hídricos, e segurança de barragens.

GESTÃO DINÂMICA DE RISCO HIDROLÓGICO DURANTE OBRAS DE ADEQUAÇÃO DE EXTRAVASORES EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO

Luisa de Moura LEÃO
Engenheira Civil Geotécnica, DSc. em Geotecnia
3EM Mineração e Geologia

Marta Sawaya MIRANDA
Engenheira Geóloga, MSc. em Engenharia de Barragens
3EM Mineração e Geologia

Bruno Manassés Alves BATISTA
Engenheiro de Minas, Esp. em Engenharia de Barragens de Rejeito
3EM Mineração e Geologia

Marconi Bicalho CESCO
Engenheiro de Minas, Esp. em Engenharia Geotécnica
3EM Mineração e Geologia

Letícia Thomaz de Souza VIEIRA
Graduanda em Engenharia de Minas
Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

A execução de obras em extravasores de barragens durante a estação chuvosa apresenta elevada complexidade e risco hidrológico, especialmente em regiões tropicais. Este estudo propõe uma abordagem de gestão dinâmica de risco aplicada à adequação do canal extravasor de uma barragem de rejeitos em Minas Gerais, permitindo a continuidade das atividades com segurança. A metodologia integra simulações de trânsito de cheias com critérios operacionais de campo, considerando níveis do reservatório entre 517 e 524 m, chuvas de 6 a 24 horas e tempos de retorno de 500 a 10.000 anos. A partir disso, foram definidos Níveis de Controle Operacional (NCO) baseados na taxa de elevação do nível d'água e no tempo até o início do vertimento. O Plano de Contingência incluiu desvio provisório, bombeamento auxiliar, monitoramento em tempo real e TARP, alinhado à Resolução ANM nº 95/2022. Os tempos até vertimento variaram de cerca de 12 a 2 horas, garantindo margem para interrupção e evacuação. Os resultados indicam que a conversão de modelagens hidrológicas em parâmetros operacionais objetivos é eficaz para gestão de risco, aumentando a resiliência e a segurança em períodos chuvosos.

ABSTRACT

Construction activities on dam spillways during the rainy season involve high operational complexity and significant hydrological risk, particularly in tropical regions. This study proposes a dynamic risk management approach applied to the upgrading of a tailings dam spillway channel in Minas Gerais, enabling safe continuity of works. The methodology integrates flood routing simulations with field-applicable operational criteria, considering reservoir levels between 517 and 524 m, rainfall durations of 6 to 24 hours, and return periods from 500 to 10,000 years. Based on these scenarios, dynamic Operational Control Levels (OCLs) were defined according to the rate of water level rise and the time to overtopping. The Contingency Plan included a temporary diversion channel, auxiliary pumping, real-time monitoring, and a Trigger Action Response Plan (TARP), aligned with ANM Resolution No. 95/2022. Estimated times to overtopping ranged from approximately 12 to 2 hours, ensuring sufficient margin for safe interruption and evacuation. The results indicate that translating hydrological modeling into objective operational parameters is effective for risk management, enhancing resilience and safety during wet-season operations.

1. INTRODUÇÃO

A execução de obras em estruturas críticas de barragens durante a estação chuvosa é um dos principais desafios da mineração contemporânea. O aumento na frequência e intensidade de cheias extremas, aliado às projeções de agravamento climático, exige revisão das práticas de projeto e operação de estruturas hidráulicas e de contenção de rejeitos [1, 2].

Este artigo apresenta uma metodologia aplicada a uma barragem de rejeitos com intervenções no extravasor durante o período chuvoso, demandando um plano robusto de contingência e evacuação. A literatura mostra que métodos determinísticos não capturam plenamente as incertezas em estruturas alteadas, recomendando abordagens probabilísticas e baseadas em confiabilidade [3, 4].

A proposta vai além da Resolução ANM nº 95/2022 [5], ao converter simulações hidrológicas complexas em limites operacionais simples e acionáveis em tempo real. A integração entre previsões meteorológicas, modelagem hidrológica e ferramentas de suporte à decisão permite antecipar eventos críticos, reduzir inundações a jusante e garantir operação segura.

Por fim, a eficácia da gestão de risco de inundação depende da integração entre modelos hidrológicos e hidráulicos, monitoramento contínuo e protocolos de resposta, assegurando a continuidade segura das obras mesmo sob alta incerteza climática [6, 7]. Para isso, o presente artigo apresenta uma metodologia baseada em Níveis de Controle Operacional ($NCOs$) que traduzem simulações hidrológicas em decisões de campo objetivas, estruturadas em quatro níveis de ação.

1.1 Contexto Técnico e Regulatório

Vertedores e canais extravasores são elementos fundamentais em sistemas hidráulicos, sendo amplamente empregados tanto para a medição de vazão em canais abertos quanto para o controle seguro de níveis d'água em reservatórios [8]. No contexto da mineração, esses dispositivos assumem papel ainda mais crítico, uma vez que barragens de rejeitos são estruturas de contenção destinadas ao armazenamento de materiais sem valor econômico provenientes dos processos de beneficiamento mineral, exigindo elevados padrões de segurança hidráulica e operacional [9].

Paralelamente, os avanços recentes nos sistemas de previsão e alerta aplicados à gestão de recursos hídricos e à operação de sistemas de drenagem têm ampliado a capacidade de antecipação e resposta a eventos hidrológicos extremos, contribuindo para a redução de riscos associados a cheias e sobrecargas hidráulicas [10].

A barragem estudada é uma estrutura de contenção de rejeitos localizada em Minas Gerais, com reservatório operando entre as cotas 517 e 524 m. A estrutura é dotada de um canal extravasor de soleira livre, cujo projeto original atendia às vazões de referência, mas apresentava velocidades de escoamento superiores aos limites recomendados pelas boas práticas internacionais [8, 11]. Diante disso, foi elaborado um novo Projeto Executivo, validado quanto à segurança hidráulica e geotécnica.

Contudo, sua implantação coincidirá com o período chuvoso, conforme série histórica de precipitação local (1993–2022). Foi exigido pelo órgão regulamentador, a elaboração de um Plano de Contingência para:

- Definir as precipitações críticas capazes de atingir a cota da soleira;
- Estabelecer limites de controle do nível do reservatório; e
- Integrar um Plano de Ação por Gatilhos (TARP) ao sistema de bombeamento existente.

Este artigo responde diretamente a essas exigências, propondo uma estrutura de gestão de risco operacional alinhada às melhores práticas internacionais e adaptada às condições locais.

1.2 Justificativa, Objetivo e Inovação Operacional

Embora o vertimento seja uma condição operacional prevista em barragens, a execução de obras no extravasor introduz um risco adicional não contemplado pelos planos tradicionais de emergência, especialmente pela exposição direta de trabalhadores. Apesar da baixa recorrência histórica de eventos de vertimento no caso estudado, a crescente não estacionariedade hidrológica, associada às mudanças climáticas, impõe maior incerteza e potencial intensificação de eventos extremos.

A principal inovação do trabalho reside na conversão de dados hidrológicos complexos em decisões operacionais objetivas (continuar, restringir ou evacuar). A partir de simulações no HEC-HMS, correlacionaram-se tempos até o vertimento com taxas de elevação do nível d'água, adotando margens de segurança conservadoras. Isso permitiu estabelecer Níveis de Controle Operacional (NCO) dinâmicos, de fácil interpretação e aplicação em campo, sem necessidade de análise técnica especializada em tempo real.

O estudo propõe, portanto, uma metodologia replicável de gestão dinâmica do risco hidrológico em obras de extravasores de barragens de mineração, estruturada em níveis de alerta, tempos de resposta e protocolos de evacuação. Tal abordagem contribui para o aprimoramento das práticas de segurança operacional e para a adaptação a cenários hidrológicos mais incertos e extremos.

2. GESTÃO DINÂMICA DE RISCO HIDROLÓGICO

A metodologia proposta visa garantir a segurança operacional durante obras no sistema extravasor de uma barragem de mineração realizadas parcialmente na estação chuvosa. A abordagem integra modelagem hidrológica, análise da resposta dinâmica do reservatório e protocolos de ação escalonada, convertendo cenários complexos em limites operacionais claros e aplicáveis em campo.

O estudo hidrológico-hidráulico de referência forneceu os parâmetros básicos, área da bacia, tempo de concentração, curvas IDF e série pluviométrica (1979-2022),

permitindo definir precipitações críticas para tempos de retorno de 500, 1.000 e 10.000 anos e durações de 6 a 24 horas.

2.1 Simulações do Trânsito de Cheias

As simulações foram realizadas no software HEC-HMS 4.12, modelando o reservatório como um nó único de armazenamento e utilizando a curva cota-descarga do extravasor (El. 525,00 m). Foram executadas 96 simulações, combinando 8 níveis iniciais de reservatório (El. 517 a 524 m), 4 durações de chuva (6, 8, 10 e 24 h) e 3 tempos de retorno (500, 1.000 e 10.000 anos), conforme esquematizado na Figura 1.

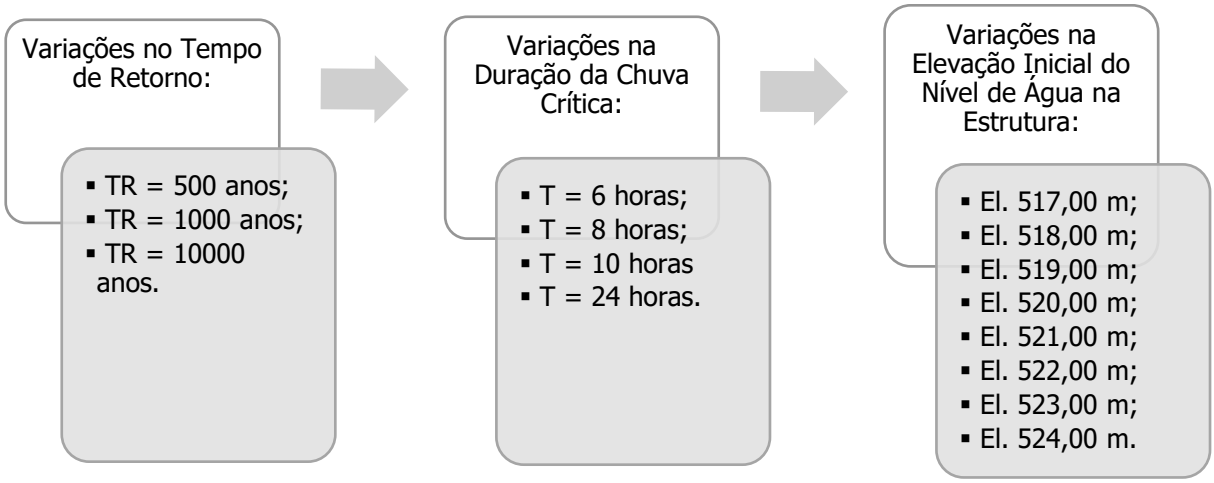


Figura 1 – Combinações simuladas no HEC-HMS

Os resultados permitiram estimar o tempo mínimo até o vertimento e a taxa de elevação do nível d'água (dH/dt), para cenários mais críticos (TR = 10.000 anos).

2.2 Nível de Controle Operacional (NCO)

O Nível de Controle Operacional (NCO) é definido a partir de uma matriz de decisão baseada em dois parâmetros críticos:

- Margem de Segurança Operacional (M_{seg}): tempo até o início do vertimento; e
- Taxa de Elevação do Reservatório (Tx_{elev}): variação da cota do nível d'água em metros por hora.

A Margem de Segurança Operacional foi definida como a diferença entre o tempo até o início do vertimento e o tempo necessário para uma evacuação segura, conforme a Equação (1), em que T_{vert} é o tempo mínimo para o início do vertimento, e T_{evac} é o tempo necessário para evacuação segura.

$$M_{seg} = T_{vert} - T_{evac} \quad (1)$$

Esse parâmetro representa o tempo efetivamente disponível para a manutenção ou interrupção segura das atividades, sendo o principal indicador temporal para a tomada de decisão operacional.

A Taxa de Elevação do Nível d'água foi estimada a partir da relação direta entre a variação da cota do reservatório e o intervalo de tempo necessário para atingir a soleira do extravasor, conforme a Equação (2).

Os valores de Tx_{elev} utilizados na classificação dos $NCOs$ foram obtidos a partir das simulações hidrológicas para cenários críticos no Hec – HMS, em que Hf é a elevação da soleira do extravasor, Hi é a elevação inicial do reservatório, Tf é o instante estimado para início do vertimento e Ti é o instante inicial da simulação.

$$Tx_{elev}\ (m/h) = \frac{Hf - Hi}{Tf - Ti} \qquad (2)$$

A classificação do NCO adota uma lógica conservadora, em que o critério mais crítico prevalece. Os quatro níveis (1-Normal, 2-Atenção, 3-Alerta e 4-Evacuação) definem limites quantitativos de M_{seg} e Tx_{elev}, além de ações correspondentes de monitoramento, comunicação e evacuação (Tabela 1).

Tabela 1 – Nível de Controle Operacional ($\boldsymbol{NCO}$)

Nível	Condição	M_{seg} (h)	Tx_{elev} (m/h)	Ações Principais
1 Normal	Situação estável	≥ 7	< 0,70	Operação normal; monitoramento a cada 6 h; revisão semanal de estratégias.
2 Atenção	Tendência de elevação	2,5 – 7	0,70 – 0,75	Reforçar monitoramento (1 h); alertar equipes; colocar plano de evacuação em prontidão.
3 Alerta	Condição crítica iminente	1,5 – 2,5	0,75 – 0,80	Restringir acessos; suspender frentes de maior risco; comunicação direta com coordenação.
4 Evacuação	Risco extremo, chuva intensa	≤ 1,5	≥ 0,80 (ou previsão severa)	Evacuação imediata; suspensão total das obras; acionamento do protocolo de emergência.

2.3 Plano de Ação (TARP)

O *Trigger Action Response Plan* (TARP) associa cada NCO a um conjunto de ações de engenharia e comunicação, garantindo resposta preventiva e redução de atrasos decisórios (Tabela 2).

Tabela 2 – Protocolo de Ação por Nível de Controle Operacional.

Nível	Ação	Ações de Engenharia	Comunicação e Gestão
1 Normal	A cada 6 h	Operação normal; verificação de instrumentos e atualização de dados.	Comunicação preventiva ao gestor; manutenção da prontidão das equipes.
2 Atenção	A cada 1 h	Inspeção de frentes próximas a áreas inundáveis; priorização de frentes seguras.	Briefings com equipes; alerta à coordenação; checagem dos canais de emergência.
3 Alerta	A cada 15 min	Suspensão de frentes críticas; mobilização de veículos e rotas de fuga; reforço de barreiras emergenciais.	Comunicação direta com Centro de Controle; acionamento das equipes de segurança; validação da cadeia de comando.
4 Evacuação	Monitoramento contínuo	Interrupção total das atividades em áreas de risco; execução do plano de evacuação; acompanhamento de níveis em tempo real.	Acionamento do Plano de Comunicação; aviso a stakeholders; disparo de sirenes ou outros alertas sonoros.

Em situação de Nível 4, após a evacuação e posterior finalização de vertimento pelo extravasor, fica o empreendedor encarregado de avaliar as condições de risco residuais para a retomada da operação das obras.

2.4 Dimensionamento da Evacuação

A evacuação foi dimensionada conforme a Resolução GMG nº 83/2025 [12], considerando densidade populacional, velocidade de deslocamento e restrições geométricas das rotas de fuga.

2.4.1 Densidade Populacional (d)

A densidade da área analisada foi estimada pela Equação (3), considerando população fixa e flutuante, com valor definido de forma conservadora, em que d é a densidade populacional (pessoas/m²), p é a população inserida; e A é a área total do caminho da rota de fuga (m²).

$$d = p / a \qquad (3)$$

2.4.2 Velocidade de Deslocamento (v)

A velocidade média foi definida em função da densidade e do tipo de terreno, conforme a Resolução GMG nº 83/2025. Para baixas densidades, adota-se velocidade constante; em maiores densidades, aplicam-se relações empíricas (Tabela).

Tabela 3 – Velocidade média de deslocamento (Resolução GMG nº 83/2025)

Densidade (pessoas/m²)	**Velocidade – Terreno plano (m/s)**	**Velocidade – Terreno inclinado ou com escadas (m/s)**
≤ 0,54	1,20	1,05
> 0,54 a ≤ 1,00	1,03	0,90
> 1,00 a ≤ 1,50	0,84	0,74
> 1,50 a ≤ 2,00	0,66	0,58
> 2,00	$V = 1{,}40 - 0{,}372 \cdot D$	$V = 1{,}23 - 0{,}327 \cdot D$

2.4.3 Tempo de Evacuação do Setor (T_{EVAC})

O Tempo de Evacuação do Setor (T_{EVAC}) foi calculado a partir da razão entre a distância máxima a ser percorrida ao longo da rota de fuga e a velocidade média de deslocamento, conforme a Equação (4), onde d é a distância máxima do ponto mais distante até a área segura, e v é a velocidade média de deslocamento estimada.

$$T_{EVAC} = d/v \tag{4}$$

2.4.4 Tempo Máximo de Deslocamento (T_{DESL})

Definido como o maior tempo de evacuação entre as rotas avaliadas; neste estudo, o valor obtido para o setor do extravasor foi adotado diretamente.

2.4.5 Tempo de Estrangulamento (T_{EST})

Corresponde ao tempo necessário para transpor o ponto de maior afunilamento da rota, considerando evacuação simultânea da população flutuante (Equação 5), onde N é o número total de pessoas a serem evacuadas, e L é a largura, em metros, do ponto crítico de estrangulamento do acesso à área segura.

$$T_{EST} = \frac{1{,}2 \cdot N}{79 \cdot L} \tag{5}$$

2.4.6 Tempo Total de Evacuação (TTE)

O tempo total resulta da combinação entre o deslocamento e o estrangulamento, conforme as Equação 6 e (7):

$$Se\ T_{DESL} > T_{EST}, \qquad TTE = T_{DESL} + T_{EST} \tag{6}$$

$$Se\ T_{DESL} < T_{EST}, \qquad TTE = T_{EST} \tag{7}$$

A comparação entre o TTE e os cenários hidrológicos críticos simulados permite avaliar a existência de janela temporal suficiente para evacuação preventiva, mesmo em condições severas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resposta Hidrológica do Reservatório

As simulações hidrológicas realizadas permitiram caracterizar, de forma integrada, a dinâmica de elevação do nível d'água do reservatório sob condições extremas de precipitação, adotando-se como cenário crítico eventos com tempo de retorno de 10.000 anos. Foram avaliadas diferentes durações de chuva (24, 10, 8 e 6 horas), sendo considerada crítica aquela associada à resposta mais rápida do sistema em termos de início de vertimento.

Os resultados consolidados (Tabela 4) evidenciam que o tempo até o início do vertimento apresenta forte dependência da elevação inicial do reservatório.

Tabela 4 – Taxa de subida do reservatório considerando variações críticas de N.A em TR = 10.000 anos

Elevação Inicial do Reservatório (m)	Duração da Chuva Crítica Estudada (h)	TR (anos)	Momento de Início do Aumento do Reservatório (h)	Momento de Início do Vertimento (h)	Tempo do Trânsito de Cheias no Reservatório até o Vertimento (h)	Elevação no Início do Aumento do Reservatório (m)	Elevação no Início do Vertimento (m)	Taxa de Elevação (m/h)
El. 517 m	24	10.000	09:00	22:00	13,00	517,10	525,30	0,63
	10		04:30	16:30	12,00	517,10	525,10	0,67
	8		04:00	-	-	517,10	524,90	-
	6		03:15	-	-	517,10	524,40	-
El. 518 m	24	10.000	09:00	21:00	12,00	518,10	525,80	0,64
	10		04:30	13:30	9,00	518,10	525,00	0,77
	8		04:00	13:20	9,33	518,10	525,10	0,75
	6		03:15	14:15	11,00	518,10	525,00	0,63
El. 519 m	24	10.000	09:00	19:00	10,00	519,10	525,20	0,61
	10		04:30	12:30	8,00	519,10	525,50	0,80
	8		04:00	11:40	7,67	519,10	525,30	0,81
	6		03:15	11:00	7,75	519,10	525,10	0,77
El. 520 m	24	10.000	09:00	18:00	9,00	520,10	525,40	0,59
	10		04:30	11:30	7,00	520,10	525,60	0,79
	8		04:00	10:20	6,33	520,10	525,20	0,81
	6		03:15	09:30	6,25	520,10	525,10	0,80
El. 521 m	24	10.000	09:00	17:00	8,00	521,10	525,70	0,58
	10		04:30	10:30	6,00	521,10	525,80	0,78

Elevação Inicial do Reservatório (m)	Duração da Chuva Crítica Estudada (h)	TR (anos)	Momento de Início do Aumento do Reservatório (h)	Momento de Início do Vertimento (h)	Tempo do Trânsito de Cheias no Reservatório até o Vertimento (h)	Elevação no Início do Aumento do Reservatório (m)	Elevação no Início do Vertimento (m)	Taxa de Elevação (m/h)
	8		04:00	09:20	5,33	521,10	525,30	0,79
	6		03:15	08:30	5,25	521,10	525,30	0,80
El. 522 m	24	10.000	09:00	16:00	7,00	522,10	525,90	0,54
	10		04:30	09:30	5,00	522,10	525,80	0,74
	8		04:00	08:20	4,33	522,10	525,20	0,72
	6		03:15	07:30	4,25	522,10	525,20	0,73
El. 523 m	24	10.000	09:00	15:00	6,00	523,10	526,10	0,50
	10		04:30	08:30	4,00	523,10	525,70	0,65
	8		04:00	07:20	3,33	523,10	525,00	0,57
	6		03:15	06:30	3,25	523,10	525,00	0,58
El. 524 m	24	10.000	09:00	13:00	4,00	524,10	525,40	0,32
	10		04:30	07:00	2,50	524,10	525,10	0,40
	8		04:00	06:20	2,33	524,10	525,10	0,43
	6		03:15	05:30	2,25	524,10	525,10	0,44

Observa-se redução sistemática do tempo até o início do vertimento com o aumento da elevação inicial do reservatório, variando de aproximadamente 12 h (El. 517 m) para cerca de 2 h (El. 524 m), considerando como referência o início do evento de precipitação. Esse comportamento evidencia elevada sensibilidade às condições iniciais de armazenamento.

A duração da chuva também exerce influência significativa na resposta hidrológica. Eventos de menor duração (6 a 10 h), associados a maiores intensidades, resultam em respostas mais rápidas, com antecipação do vertimento e redução do tempo de trânsito da cheia, conforme indicado na Tabela 4 e na Figura 2.

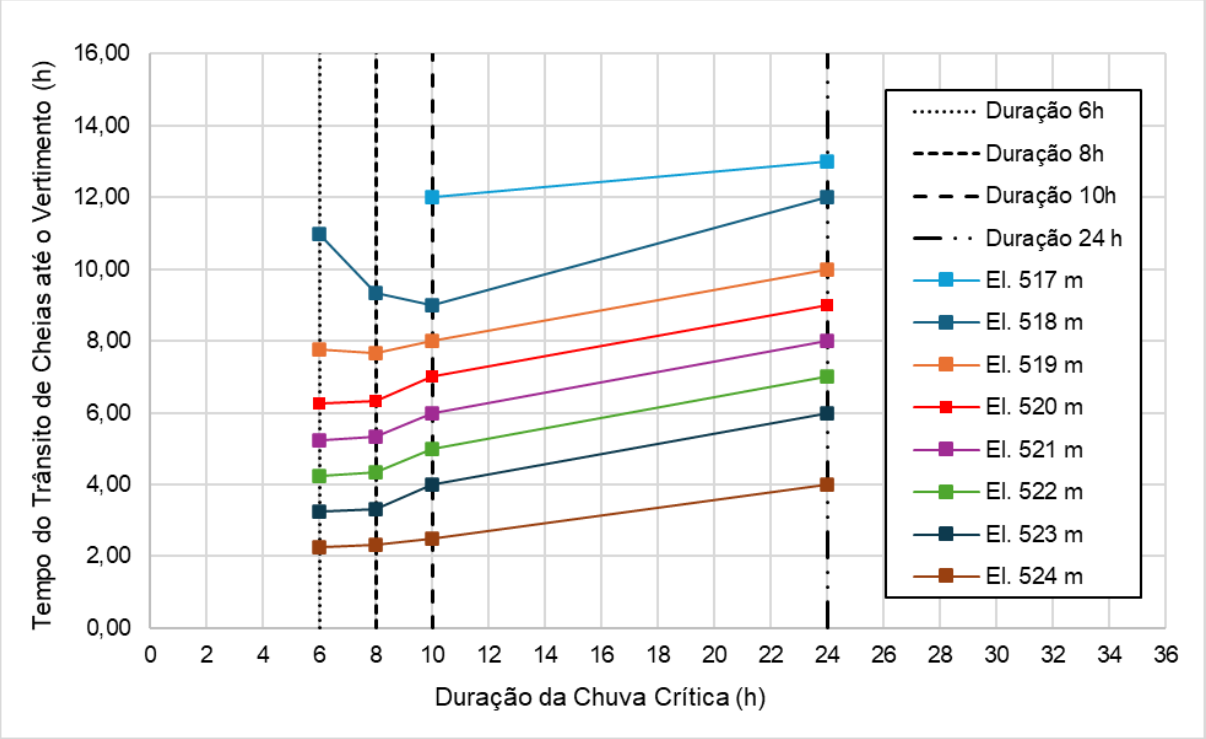


Figura 2 – Tempo até o início do vertimento para duração de chuvas no TR = 10.000 anos

Os resultados indicam que a resposta do reservatório é controlada pela interação entre armazenamento disponível e intensidade do evento, resultando em relação não linear entre taxa de elevação e tempo até o início do vertimento. Assim, a avaliação de risco operacional deve considerar simultaneamente a cota do reservatório e a taxa de variação do nível d'água.

3.2 Desempenho do Plano de Evacuação frente aos Cenários Críticos

Como indicado, o atingimento do Nível 4 do TARP implica o acionamento imediato do Plano de Evacuação da área operacional. O dimensionamento da evacuação foi realizado com base na metodologia estabelecida no Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM) da Barragem, considerando as características específicas da população flutuante envolvida nas obras do extravasor.

Os parâmetros adotados e os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela .

Tabela 5 – Resultados do Dimensionamento da Evacuação

Parâmetros	Valor	Unidade
Densidade populacional	0,009	pessoas/m²
Velocidade de Escoamento	1,05	m/s
Tempo de Evacuação do Setor	10,51	minutos
Tempo Máximo de Deslocamento	10,51	minutos
Tempo de Estrangulamento	0,0091	segundos
Tempo total de Evacuação	10,51	minutos

O Tempo de Evacuação do Setor (TES) foi calculado a partir de uma distância máxima de 663 m e velocidade média de deslocamento de 1,05 m/s, resultando em aproximadamente 631 segundos (10 minutos e 51 segundos), em conformidade com os critérios da Resolução GMG nº 83/2025.

Observa-se que o tempo de estrangulamento (TE), calculado com base na largura mínima da rota de fuga (5 m) e na população considerada (30 pessoas), apresenta valor desprezível quando comparado ao tempo de deslocamento, não influenciando significativamente o tempo total de evacuação. Dessa forma, o Tempo Total de Evacuação (TTE) é essencialmente governado pelo tempo de deslocamento ao longo da rota.

Os resultados indicam que a rota de fuga apresenta condições favoráveis à evacuação segura, caracterizadas por baixa densidade populacional e elevada capacidade de escoamento, mantendo o fluxo em regime livre. As velocidades adotadas são compatíveis com deslocamentos em terreno inclinado ou com desníveis suaves, conforme estabelecido pela GMG nº 83/2025 [12], apresentados na Tabela 3.

Adicionalmente, os resultados obtidos nos exercícios simulados do PAEBM indicaram tempos de evacuação entre 4 minutos e 41 segundos e 5 minutos e 20 segundos, significativamente inferiores ao valor analítico adotado. Essa diferença confirma o caráter conservador da metodologia empregada, garantindo margem adicional de segurança para a evacuação da população flutuante.

Dessa forma, conclui-se que o tempo total de evacuação adotado (10,51 minutos) é adequado e conservador, sendo compatível com os cenários hidrológicos críticos analisados e suficiente para garantir a segurança dos trabalhadores, desde que os gatilhos operacionais sejam acionados de forma tempestiva.

3.3 Integração entre Evacuação e Cenários Hidrológicos

A aplicação dos critérios de Nível de Controle Operacional (NCO) aos cenários simulados indica que, para elevações iniciais mais baixas (El. 517-520 m), as condições tendem a se enquadrar nos Níveis 1 e 2, caracterizados por margens de segurança superiores a 5 horas e taxas de elevação inferiores a 0,80 m/h.

Por outro lado, para níveis mais elevados do reservatório (El. 521-524 m), especialmente sob eventos de curta duração (6 a 10 h), observa-se a transição para Níveis 3 e 4, nos quais as margens de segurança são reduzidas (≤ 2,5 h) e as taxas de elevação se aproximam ou ultrapassam os limiares críticos.

Esses resultados confirmam a aplicabilidade do NCO como ferramenta de suporte à decisão, permitindo a identificação antecipada de condições operacionais críticas e o acionamento tempestivo das medidas de controle e evacuação.

A comparação entre o Tempo Total de Evacuação (~11 min) e os tempos mínimos para início do vertimento, mesmo nos cenários mais críticos (≥ 2 h), demonstra a existência de margem temporal significativa para evacuação preventiva da população flutuante. Isso confirma que, com acionamento tempestivo dos gatilhos operacionais e monitoramento em tempo real, o risco à integridade física dos trabalhadores é adequadamente mitigado [16], tal como apresentado pelo esquema da Figura 3.

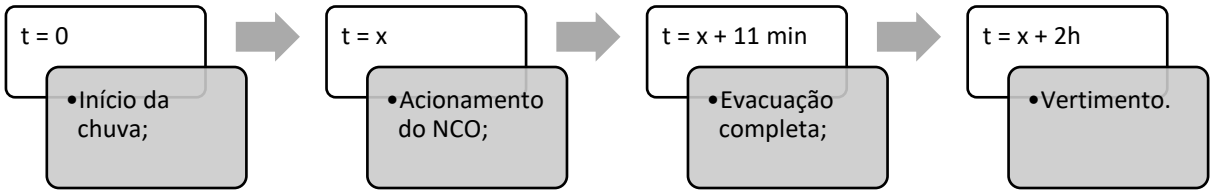


Figura 3 – Comparação entre o Tempo Total de Evacuação e os tempos mínimos até o vertimento por nível inicial do reservatório (TR = 10.000 anos)

Isso mostra que a análise foi conduzida de forma conservadora, tanto na estimativa populacional quanto nos parâmetros de deslocamento, o que aumenta a confiabilidade dos resultados e reforça sua aplicabilidade prática no contexto do Plano de Contingência.

3.4 Efetividade das Medidas Preventivas do Plano de Contingência

As medidas preventivas adotadas no Plano de Contingência mostram-se coerentes com os cenários hidrológicos simulados e com os tempos críticos identificados. O monitoramento em tempo real, operando de forma contínua e redundante, constitui o principal elo entre os resultados das simulações e a tomada de decisão operacional, permitindo a aplicação prática dos limites definidos para interrupção de atividades e acionamento da evacuação, em linha com plataformas modernas de segurança de barragens que combinam IoT, e sistemas de alerta para avaliação contínua de segurança e disparo de ações preventivas [17].

A implantação de um canal de desvio a jusante representa uma camada adicional de segurança hidráulica, reduzindo a probabilidade de obstruções durante as intervenções no extravasor e mitigando riscos associados a vertimentos não controlados [10]. De forma complementar, o uso do sistema de bombeamento como ferramenta auxiliar de controle do nível d'água contribui para a manutenção das cotas operacionais seguras em condições ordinárias, sem comprometer o princípio

fundamental de que o extravasor permanece como o principal elemento de segurança para eventos extremos.

Do ponto de vista conceitual, o arranjo dessas medidas configura uma estratégia preventiva multicamadas, alinhada às boas práticas internacionais para gestão de risco em barragens durante fases transitórias [18], nas quais o risco hidrológico tende a ser temporariamente elevado.

3.5 Validação Operacional e Discussão Crítica

Os simulados de evacuação apresentaram tempos significativamente inferiores aos estimados analiticamente (4 min 41 s e 5 min 20 s), confirmando o caráter conservador da metodologia adotada. Essa diferença é esperada e desejável em estudos de segurança, pois indica que os valores calculados oferecem margem adicional de proteção diante de incertezas operacionais [19].

A principal contribuição do estudo está na integração quantitativa entre a resposta hidrológica do reservatório, os limites operacionais e o desempenho da evacuação, criando um elo direto entre engenharia hidráulica e gestão de emergências. Abordagens análogas vêm sendo propostas na literatura de cheias e rompimento de barragens, integrando modelos hidrodinâmicos de propagação de onda de cheia com redes viárias, abrigos e comportamento de evacuação, a fim de otimizar rotas, minimizar o tempo de deslocamento e reduzir o risco de perda de vidas [20]. Essa abordagem reforça a robustez técnica do Plano de Contingência e pode ser replicada em outros empreendimentos, desde que ajustada às condições geométricas e operacionais de cada caso.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que o estudo desenvolvido permitiu estabelecer uma abordagem técnica robusta e preventiva para a gestão de riscos hidrológicos associados à operação da barragem durante intervenções no sistema extravasor. A aplicação sistemática de simulações de trânsito de cheias, aliada à definição de níveis operacionais graduados e ações correspondentes, possibilitou a antecipação de cenários críticos e a estruturação de respostas proporcionais ao aumento do nível de água no reservatório, reforçando a segurança operacional e a proteção das equipes envolvidas.

Os resultados demonstraram que, mesmo no cenário mais crítico (El. 524 m, chuva de 6 h, TR = 10.000 anos), o tempo mínimo até o vertimento (~2 h) supera amplamente o Tempo Total de Evacuação calculado (~11 min), confirmando a adequação dos $NCOs$ definidos.

Adicionalmente, a incorporação de medidas preventivas, a avaliação da eficiência dos sistemas de rebaixamento e a análise histórica das precipitações contribuíram para um entendimento mais consistente do regime hidrológico local e de sua influência no comportamento do reservatório. Nesse contexto, o trabalho demonstra que a integração entre modelagem hidrológica, monitoramento contínuo e planejamento de ações contingenciais constitui uma estratégia eficaz para reduzir incertezas, mitigar

riscos residuais e apoiar a tomada de decisão em condições hidrometeorológicas adversas, fortalecendo a gestão da segurança de barragens em ambientes operacionais complexos.

5. PALAVRAS-CHAVE

Barragens de Mineração; Gestão de Risco Operacional; Obras em Época Chuvosa; Simulação Hidrológica; Plano de Contingência.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC (2021) – Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

[2] APEL, H.; THIEL, A.; BUCHHOLZ, O.; KREIBICH, H. (2004) – Flood Risk Assessment and Associated Uncertainty. Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 4, p. 295-308. [S.L.]

[3] UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE (2014) – Risk-Based Analysis for Dam Safety. Washington, Estados Unidos.

[4] FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. (2000) – The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents. Géotechnique, v. 50, n. 3, p. 291-302. Londres, Reino Unido.

[5] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM (2022) – Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Brasília, Brasil.

[6] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO (2013) – Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No. 1072. Genebra, Suíça.

[7] VICK, S. G. (2002) – Degrees of Belief: Subjective Probability and Engineering Judgment. Reston: ASCE Press, Estados Unidos.

[8] PORTO, R. M. (2006) – Hidráulica Básica. 4. ed. São Carlos: EESC/USP, Brasil.

[9] AZAM, S.; LI, Q. (2010) – Tailings Dam Failures: A Review of The Last One Hundred Years. Geotechnical News, v. 28, n. 4, p. 50-54. [S.L.]

[10] TUCCI, C. E. M. (2005) – Modelos Hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, Brasil.

[11] WITT, A.; MALAMUD, B. D.; KILBURN, C. R. J. (2017) – Quantitative analysis of Historical Dam Failures in the UK. Landslides, v. 14, p. 281-294. [S.L.]

[12] MINAS GERAIS. (2025) – Resolução GMG nº 83, de 2025: Dispõe sobre Diretrizes para Gestão de Risco e Segurança Em Barragens no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil.

[13] SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS – SFPE (2016) – Handbook of Fire Protection Engineering. 5. ed. New York: Springer, Estados Unidos.

[14] HELBING, D.; MOLNÁR, P. (1995) – Social Force Model for Pedestrian Dynamics. Physical Review. v. 51, n. 5, p. 4282-4286. [S.L.]

[15] KULIGOWSKI, E. D.; PEACOCK, R. D.; HOSKINS, B. L. (2010) – A Review of Building Evacuation Models. NIST Technical Note 1680. Gaithersburg, Estados Unidos.

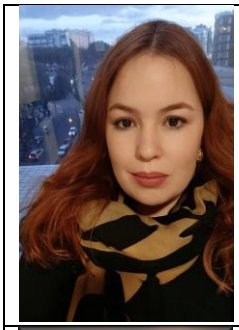
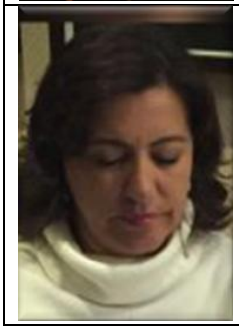
[16] MCDONALD, N.; LANGFORD, D.; WILSON, S. (1999) – The Role of Time in Accident Analysis. Safety Science, v. 33, n. 1-2, p. 1-17. [S.L.]

[17] ZHANG, L.; XU, Y.; JIA, J.; WANG, Y. (2021) – Smart Dam Safety Monitoring Based on IOT and Data-Driven Technologies: A Review. Journal of Cleaner Production, v. 278, 123979. [S.L.].

[18] FELL, R.; BOWLES, D. S.; ANDERSON, L. R.; BELL, G. (2005) – The Status of Methods for Estimation of The Probability of Failure of Dams And Levees. Canadian Geotechnical Journal, v. 42, n. 2, p. 530-541. [S.L.].

[19] AVEN, T. (2011) – On the New ISO Guide on Risk Management Terminology. Reliability Engineering & System Safety, v. 96, n. 7, p. 719-726. [S.L.].

[20] DOTTORI, F.; SALAMON, P.; BIANCHI, A.; ALFIERI, L.; HIRPA, F.; FEYEN, L. (2016) – Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping. Advances in Water Resources, v. 94, p. 87-102. [S.L.].

	**Luisa de Moura LEÃO** Engenheira Civil Geotécnica, doutora em Geotecnia (UFOP) e mestra em Saneamento e Geotecnia Ambiental (UFLA). Possui 8 anos de experiência em geotecnia aplicada à mineração, com atuação em segurança de barragens e pilhas, fechamento de minas, modelagem numérica e gestão de riscos com foco climático e normativo.
	**Marta Aparecida Sawaya MIRANDA** Geóloga/Geotécnica, mestra em Engenharia de Barragens (UFOP) e graduada em Geologia (UFMG). Possui mais de 20 anos de experiência em geotecnia de mineração, com atuação em segurança, auditoria de barragens, projetos de pilhas e descaracterização, incluindo estudos geológico-geotécnicos, hidráulicos e de liquefação. Auditora cadastrada na FEAM e ANM.

	**Bruno Manassés Alves BATISTA** Engenheiro de Minas (UFMG), especialista em barragens de rejeito (Unyleya) e pós-graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental. Possui mais de 10 anos de experiência em consultoria mineral, com atuação em estudos hidrológicos e geotécnicos, segurança de estruturas, análises de ruptura e licenciamento ambiental em Minas Gerais.
	**Marconi Bicalho CESCO** Engenheiro de Minas (UFMG), M.Eng. em Engenharia Geotécnica (PUC Minas) e mestrando em Engenharia Mineral (UFOP). Possui 13 anos de experiência em mineração, com atuação em gestão e operação de mina, planejamento de lavra e projetos de mineração e geotecnia.
	**Letícia Thomaz de Souza VIEIRA** Graduanda em Engenharia de Minas (UFMG) e técnica em Edificações (CEFET-MG). Atua no apoio a estudos geotécnicos, análise de dados e elaboração de materiais técnicos, com foco em segurança.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

GESTÃO E ADAPTAÇÃO DOS ELEMENTOS DE AUTOPROTEÇÃO E EVACUAÇÃO DE COMUNIDADES INDÍGENAS SITUADAS EM ZONAS DE AUTOSSALVAMENTO DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO

Kayto FIGUEIREDO
Técnico em Emergências Industriais Especializado - Vale Metais Básicos

Lívia MIRANDA
Técnico em Emergências Industriais II - Vale Metais Básicos

Umenia LIMA
Coordenadora Administrativa – Vale Metais Básicos

Carlos Alex LIMA
Gerente de Serviços Geotécnicos – Vale Metais Básicos

Hugo CAMPELO
Gerente Geral de Serviços Técnicos – Vale Metais Básicos

RESUMO

A gestão da segurança de barragens de mineração em contextos que envolvem comunidades indígenas demanda abordagens específicas, sensíveis às particularidades socioculturais e territoriais desses povos. Este artigo apresenta a experiência do empreendimento Salobo Metais, operado pela Vale Metais Básicos, na adaptação dos elementos de autoproteção e evacuação do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM) para o Povo Indígena Xikrin, que acessa sazonalmente áreas inseridas na Zona de Autossalvamento (ZAS) durante a coleta tradicional de castanha-do-pará.

A partir de um levantamento socioeconômico adaptado, da implementação de sinalizações bilíngues, da adequação dos sistemas de alerta sonoro e do desenvolvimento de ações de capacitação moldadas à realidade cultural indígena, foram estabelecidos mecanismos de comunicação, prevenção e resposta a emergências compatíveis com a dinâmica de ocupação do território e com a preservação das práticas tradicionais.

Os resultados demonstram que a adoção de estratégias culturalmente sensíveis contribui para o fortalecimento da percepção de risco, da eficácia dos procedimentos de evacuação e da construção de uma cultura de segurança compartilhada, reforçando a sustentabilidade das operações minerárias e o respeito aos direitos e à identidade dos povos indígenas.

ABSTRACT

The management of dam safety in mining contexts involving Indigenous communities requires specific approaches that are sensitive to sociocultural and territorial particularities. This paper presents the experience of the Salobo Metais operation, operated by Vale Base Metals, in adapting the self-protection and evacuation elements of the Emergency Action Plan for Mining Dams (PAEBM) to the Xikrin Indigenous Peopl, who seasonally access areas within the Self-Rescue Zone (SRZ) during the traditional Brazil nut harvesting period. Based on an adapted socioeconomic survey, the implementation of bilingual emergency signage, the adjustment of sound alert systems, and the development of training activities tailored to the Indigenous cultural context, communication, prevention, and emergency response mechanisms were established. These measures were designed to align with territorial dynamics while preserving traditional practices. The results indicate that culturally sensitive strategies enhance risk perception, improve evacuation effectiveness, and support the development of a shared safety culture, contributing both to the sustainability of mining operations and to the protection of Indigenous rights and identities.

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens de mineração constitui um dos principais desafios da gestão de riscos no setor mineral, especialmente em contextos nos quais populações potencialmente afetadas apresentam modos de vida, organização social e formas de ocupação do território distintas dos padrões urbanos convencionais. Nesse cenário, a presença de comunidades indígenas em áreas sob influência de empreendimentos minerários impõe a necessidade de soluções técnicas que transcendam abordagens padronizadas, incorporando dimensões culturais, linguísticas e territoriais específicas.

O empreendimento Salobo Metais, operado pela Vale Metais Básicos no sudeste do estado do Pará, insere-se nesse contexto ao coexistir, direta ou indiretamente, com o Povo Indígena Xikrin do Cateté. Embora a Terra Indígena não esteja localizada na área diretamente afetada pelas estruturas de barramento, o acesso sazonal de áreas inseridas na Zona de Autossalvamento (ZAS), durante o período tradicional de coleta da castanha-do-pará, estabelece uma interface relevante entre a comunidade indígena e as estruturas geotécnicas do empreendimento.

Diante desse cenário, tornou-se necessário desenvolver e implementar estratégias específicas no âmbito do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM), capazes de garantir a autoproteção, a comunicação eficaz e a evacuação segura da população indígena em situações de emergência, sem comprometer suas práticas culturais e seu modo de vida tradicional. Assim, este artigo tem como objetivo apresentar as metodologias adotadas, os desafios enfrentados e os resultados obtidos na adaptação dos elementos de autoproteção e evacuação para o Povo Indígena Xikrin, evidenciando a importância da construção de soluções participativas e culturalmente sensíveis para a promoção da segurança e da sustentabilidade das operações minerárias.

2. O EMPREENDIMENTO

O empreendimento Salobo Metais, operado pela Vale Metais Básicos, configura-se como a maior operação de cobre em atividade no Brasil, assumindo posição estratégica no contexto da mineração nacional. Localizado no sudeste do estado do Pará, no interior da Floresta Nacional do Tapirapé-Aquiri, no município de Marabá, o projeto apresenta elevada relevância diante das atuais demandas globais por minerais críticos. Nesse cenário, o cobre destaca-se como insumo essencial para a transição energética, sendo amplamente empregado em sistemas de geração de energia renovável, mobilidade elétrica e no desenvolvimento de infraestruturas sustentáveis. Assim, o empreendimento Salobo desempenha papel fundamental tanto no atendimento às exigências do mercado internacional quanto na consolidação do Brasil como fornecedor estratégico de minerais voltados às tecnologias de baixo carbono.

Além de sua relevância produtiva, o empreendimento exerce influência direta no desenvolvimento socioeconômico da região de Marabá e Parauapebas, gerando

empregos, arrecadação e investimentos em infraestrutura, ao mesmo tempo em que impõe desafios relacionados à gestão ambiental e territorial.

Adicionalmente, o empreendimento tem desenvolvido estratégias voltadas à gestão do relacionamento com as comunidades do entorno, buscando promover o diálogo contínuo, a participação social e o compartilhamento de benefícios decorrentes da atividade mineral. Essas ações incluem mecanismos de escuta ativa, programas socioeconômicos e iniciativas voltadas ao fortalecimento de capacidades locais, com o objetivo de mitigar impactos, prevenir conflitos e contribuir para o desenvolvimento territorial.

Para o Salobo, a atuação junto às comunidades insere-se como elemento central da sua governança, reforçando a importância da dimensão social na sustentabilidade das operações minerárias.



Figura 1 – Complexo Minerador do Salobo

3. CARACTERIZAÇÃO DO POVO INDÍGENA XIKRIN

Os Xikrin são um povo indígena da Amazônia brasileira pertencente ao conjunto cultural e linguístico dos Mebengôkre (Kayapó), habitantes da Terra Indígena Xikrin do Cateté, localizada nos municípios de Parauapebas e Água Azul do Norte no estado do Pará. De acordo com levantamento do IBGE de 2022 a população registrada é de aproximadamente 1.737 pessoas, distribuídas em 29 aldeias habitando em um território de cerca de 439 mil hectares, fundamental para seu modo de vida tradicional **[1]**



Figura 2 – Área de abrangência da Terra Indígena Xikrin do Cateté

Os Xikrin falam a língua Mebengôkre, pertencente à família linguística Jê (tronco Macro-Jê). A língua é um elemento central de identidade, sendo utilizada no cotidiano das aldeias, enquanto o português é menos difundido entre mulheres, crianças e pessoas mais velhas.

Desta maneira, o Povo Indígena Xikrin do Cateté possui 40 anos de relacionamento com a Vale e é uma comunidade importante para a o desenvolvimento e a sustentabilidade da empresa.

4. A INTERFACE/INTERAÇÃO/RELACIONAMENTO ENTRE COMUNIDADE E EMPREENDIMENTO

A distância existente entre a Mina do Salobo e a Terra Indígena Xikrin do Cateté desobriga o empreendimento da elaboração de um Componente Indígena como etapa do licenciamento ambiental. No entanto, considerando a eventual presença de indígenas na região para a realização da coleta tradicional de castanha, a empresa Salobo Metais mantém, desde fevereiro de 1997, condicionantes ambientais que preveem a implantação de ações voltadas à garantia da preservação física e cultural da comunidade Xikrin durante o período de desenvolvimento das atividades no empreendimento.

Anualmente, a partir de meados do mês de janeiro, parte do Povo Indígena Xikrin desloca-se até a Floresta Nacional do Tapirapé-Aquiri para a prática da atividade tradicional de coleta de castanha. Essa ocupação sazonal da área encontra-se reconhecida no âmbito do processo de licenciamento ambiental do empreendimento, que estabelece condicionantes específicas voltadas à proteção dos direitos indígenas e à compatibilização entre a atividade minerária e os usos tradicionais do território. Nesse sentido, foram instituídos acordos e protocolos de relacionamento que disciplinam o acesso à área, a segurança das comunidades, a comunicação entre as

partes e a mitigação de eventuais impactos. Tais instrumentos constituem elementos fundamentais da gestão socioambiental do empreendimento, assegurando o respeito às práticas culturais dos Xikrin e promovendo a previsibilidade e a governança na interação entre o projeto mineral e o povo indígena envolvido.

Para os povos indígenas dessa etnia, a *Bertholletia excelsa* (castanha-do-pará) constitui uma importante fonte de alimento, além de desempenhar papel relevante em suas tradições culturais e práticas econômicas. Ademais, a castanha exerce função fundamental na conservação das florestas, uma vez que os povos indígenas mantêm profunda conexão com os biomas nos quais estão inseridos e atuam como importantes agentes de proteção ambiental. Dessa forma, a prática sustentável da coleta de castanha pela comunidade indígena é essencial para assegurar a preservação da espécie e contribuir para a proteção da biodiversidade das florestas tropicais.

Durante o período de coleta da castanha, os indígenas permanecem acampados na margem direita do rio Itacaiúnas, no local denominado “Acampamento Caldeirão”, situado em área sob administração da Salobo Metais S.A. Ao longo desse período, com o objetivo de assegurar a integridade física e cultural do povo Xikrin, o empreendimento mantém ações estruturadas voltadas aos eixos de comunicação, proteção da integridade física e preservação dos aspectos culturais da comunidade indígena.

Manter a tradição do Povo Indígena Xikrin viva é uma de nossas prioridades.

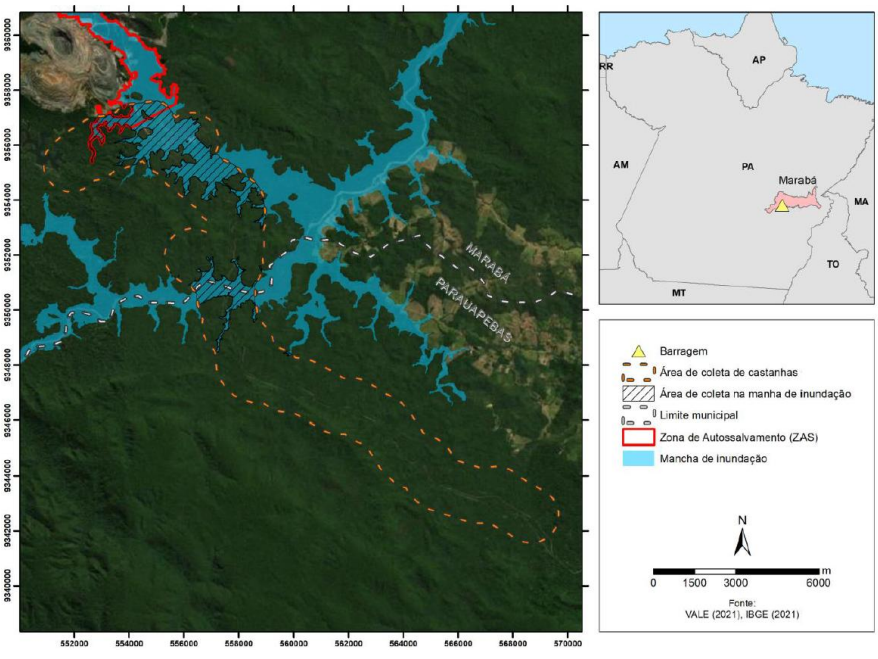


Figura 3 – Área de coleta de castanhas.

5. INTERAÇÕES ENTRE COMUNIDADE E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Em virtude do amplo conhecimento da floresta e da habilidade de exploração sustentável dos recursos naturais providos por ela, os indígenas do Povo Xikrin possuem uma dinâmica ocupacional nômade e transitória. Durante a temporada de

coleta das castanhas, essa prática é evidenciada, sendo possível traçar trechos e caminhos que são utilizados com frequência dentro da unidade para as atividades que garantem sua subsistência e promoção de sua cultura.

Esse movimento variado da comunidade é ocasionado por fatores que estão diretamente associados a manutenção da sua permanência ali, como a subsistência e práticas culturais. Desta maneira, para realização dessas atividades o caminho percorrido pelo povo acompanha:
A disposição dos principais castanhais para a atividade da coleta; rotas de animais objetos de caça e; Localização dos principais cursos d'água que em grande maioria, estão próximos ou são os principais contribuidores de algumas barragens. Nessa dinâmica, os trajetos do povo indígena interseccionam e tangenciam as zonas de autossalvamento das estruturas ou vão ao direto encontro das barragens e diques da unidade.

Ainda que essas atividades sejam realizadas em área por muitas das vezes controladas, para a Vale Metais Básicos é importante garantir que tais rotinas sejam mantidas com o mínimo de intervenção possível, garantindo o prolongamento e avivamento das tradições deste povo. A grande linha tênue desse trabalho é dosar elementos de segurança e proteção sem que aconteça o aculturamento dessa população.

É importante relembrar que, apesar da grande recorrência dos deslocamentos do povo, a dinâmica habitacional e de permanência ocorre de forma diferente. Ao início do período de coleta das castanhas, os indígenas se estabelecem em local denominado de "caldeirão", localizado fora das manchas de inundação das estruturas, onde realizam a adequação e ambientação do local para a prolongada estadia.

Em suma, a interação da comunidade com as estruturas geotécnicas está diretamente associada ao acesso à ZAS para realização de atividades essenciais para sua permanência no local, ocasionando em uma dinâmica onde não é possível segregar, separar ou limitar tais trajetos.

Assegurar a continuidade das práticas culturais, mesmo quando estas interagem com nossas estruturas geotécnicas, integra o compromisso da Vale Metais Básicos com a sua licença social.

Desta maneira, a interface com os indígenas no que tangencia o tema barragens é conduzida pelo time dedicado ao Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM) do Salobo, principal contribuinte e fonte deste documento.

6. LEVANTAMENTO SOCIOECONÔMICO ADAPTADO

Pensar em levantamento socioeconômico é refletir sobre o conceito de sociedade e economia, uma vez que tais práticas estão comumente associadas e direcionadas para indivíduos onde a cultura e civilização acompanham uma lógica ordenada, tecnológica e bem padronizada. Contudo, quando pensamos em uma população fundamentalmente originária e com costumes próprios, as metodologias

convencionais carecem de uma adaptação que enxerguem as especificidades e necessidades deste povo. Considerando isso, a Vale Metais Básicos se propôs a realizar um trabalho de escuta e entendimento para traduzir uma metodologia robusta e amplamente aplicada em uma dinâmica que atenda e compreenda as características e informações que o Povo Indígena Xikrin possui acerca de si mesmo.

Na lógica do Povo Xikrin, a carência de uma gama de informações que normalmente são utilizadas em estudos como este, nos leva a definir perguntas e parâmetros mínimos que sejam suficientemente relevantes para a inserção dentro de um plano de ação de emergência que os considere. Desta maneira, a partir disso, foram definidas como informações mínimas as seguintes questões:

1. **Nome**, considerando o seu nome tradicional em Mebengokré, uma vez que – em virtude do grande contato com o homem branco - muitos possuem outros nomes em português;
2. **Aldeia**, entre as atuais 29 registradas e formalizadas;
3. **Sexo**, considerando as diferenças culturais que possuem atribuídas ao gênero;
4. **Idade**, dado básico e extremamente deficiente nesta comunidade, por não possuírem uma lógica de contagem e acompanhamento;
5. **Presença de comorbidades, dificuldades de locomoção ou dificuldades auditivas**, elementos de extrema relevância que podem impactar diretamente o procedimento de autossalvamento e evacuação.

Passando para a etapa de campo, os levantamentos foram feitos pela equipe do PAEBM da unidade, composta por profissionais capacitados e previamente orientados quanto à abordagem culturalmente sensível, utilizando formulário estruturado contendo as informações supracitadas. Durante as atividades, foram entrevistados todos os indígenas presentes no local, reforçando a diretriz de abrangência total e assegurando que nenhum subgrupo, aldeia ou indivíduo em condição de vulnerabilidade fosse excluído do mapeamento. A abordagem adotada priorizou a proximidade com a comunidade, promovendo diálogo direto com as lideranças tradicionais, de modo a fortalecer o vínculo institucional e ampliar o engajamento da comunidade indígena no processo de coleta de informações.



Figura 4 – Registro do levantamento socioeconômico adaptado.

6.1 Resultados obtidos

Em relação ao perfil demográfico, os levantamentos populacionais realizados no acampamento Caldeirão demonstram que a composição demográfica dos indígenas Xikrin presentes na região durante a coleta de castanhas é ampla, heterogênea e multigeracional. Os registros indicam a presença simultânea de crianças, adolescentes, adultos jovens, adultos maduros e idosos, formando um grupo diversificado em termos de idade e perfis sociais.

6.1.1 Divisão por aldeias

As aldeias representadas são majoritariamente Kateté, Watik, Barai, Pukatieray, Kamkrokok e Moinoro, evidenciando que a atividade de coleta envolve múltiplos núcleos familiares e diferentes subdivisões da comunidade.

6.1.2 Sexo

A distribuição por sexo demonstra equilíbrio entre homens e mulheres, com ligeira predominância feminina.

6.1.3 Idade

Em termos etários, observa-se um perfil variado que inclui desde crianças pequenas (1 a 6 anos) até adultos de meia-idade e idosos acima de 60 anos.

6.1.4 Comorbidades e dificuldades gerais

Também aparecem registros de gestantes, adolescentes, além de indivíduos com comorbidades como hipertensão, diabetes, asma e casos de pneumonia em crianças, compondo um grupo que inclui pessoas em situação de maior vulnerabilidade, ainda que estes, por sua vez não possuam dificuldades auditivas ou de locomoção que pudessem, eventualmente, dificultar o processo de autossalvamento.





Figuras 5 e 6 – Registros do levantamento socioeconômico adaptado.

De forma geral, o perfil demográfico indica que o período de coleta atrai um conjunto numeroso, diversificado e com presenças múltiplas de grupos familiares completos, incluindo crianças, jovens, mulheres, lideranças tradicionais e adultos em idade produtiva.

Esse cenário reforça a importância de mecanismos de autoproteção adaptados, comunicação bilíngue e estratégias específicas de evacuação para este público, ainda que não haja comorbidades relevantes que afetem o procedimento de autossalvamento.

7. ELEMENTOS DE AUTOPROTEÇÃO ADAPTADOS: SINALIZAÇÃO DE EMERGÊNCIA

No contexto do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM), os elementos de autoproteção constituem instrumentos fundamentais para garantir a segurança das populações potencialmente afetadas em caso de emergência envolvendo a estrutura da barragem. Entre esses elementos, destaca-se a sinalização de emergência, composta por placas de rota de fuga e de pontos de encontro.

No trecho da ZAS que intersecciona a área de coleta das castanhas, a implantação desses elementos de autoproteção ocorreu de forma adaptada à realidade sociocultural da comunidade, considerando aspectos linguísticos e territoriais. Como parte desse processo de adaptação, as placas de rota de fuga e de pontos de encontro passaram a incorporar a língua jê, tradicionalmente utilizada pela comunidade indígena, permitindo que as orientações de emergência fossem compreendidas de maneira mais acessível, respeitosa e eficiente. A utilização da língua indígena nas

sinalizações fortalece não apenas a comunicação preventiva em situações de risco, mas também valoriza a identidade cultural da comunidade, promovendo maior aproximação entre o empreendedor e os povos indígenas envolvidos.





Figuras 7 e 8 – Placas de Rota de Fuga e Ponto de Encontro Adaptados.

As placas de rota de fuga possuem a função de orientar o deslocamento seguro da população em caso de eventual rompimento da barragem. Essas sinalizações indicam os caminhos mais seguros a serem percorridos até áreas protegidas, previamente definidas nos estudos de inundação e nos protocolos de emergência. Já as placas de ponto de encontro identificam os locais seguros onde a comunidade deverá permanecer até o acolhimento e direcionamento pelas equipes responsáveis.

A implementação desses elementos de autoproteção integra um processo mais amplo de aproximação entre o empreendimento e os Povos Indígenas Xikrin, baseado no diálogo, na escuta e na construção conjunta de estratégias de segurança compatíveis com as especificidades locais. Assim, a adaptação da sinalização de emergência representa uma medida de respeito às características culturais e territoriais das comunidades, promovendo maior efetividade das ações de proteção e salvaguarda da vida humana.

8. ELEMENTOS DE AUTOPROTEÇÃO ADAPTADOS: SISTEMA DE ALERTA SONORO DE EMERGÊNCIA

O sistema de alerta sonoro é constituído por estruturas instaladas em postes autônomos, alimentados por baterias e painéis solares, equipados com cornetas responsáveis pela propagação do som de emergência nas áreas potencialmente afetadas. O acionamento das sirenes pode ocorrer de forma manual, realizado pelo Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG), ou de forma automática, por meio do chamado Acionamento Automático de Sirenes (AAS). Esse acionamento automático ocorre a partir da identificação de condições críticas na estrutura da barragem, detectadas por instrumentos de monitoramento geotécnico, como os tiltímetros.

Como supracitado, em caso de identificação de cenário crítico, o sistema realiza automaticamente o acionamento das sirenes, permitindo a rápida disseminação do alerta às populações localizadas na Zona de Autossalvamento (ZAS). No território

utilizado pelos indígenas, especialmente nas áreas destinadas à coleta sazonal da castanha, uma parcela de oito sirenes do parque total foi estrategicamente adaptada para garantir a cobertura sonora bilíngue adequada durante os períodos de ocupação e circulação da comunidade.

Assim como ocorrido com a sinalização de emergência, esse sistema também passou por adequações específicas voltadas à realidade sociocultural e linguística da população indígena, visando garantir maior efetividade na comunicação em situações de emergência.



Figura 9 – Sistema de Alerta Principal – Sirene de Emergência.

Ainda sobre este tema, a Vale Metais Básicos também dispõe de um sistema de alerta secundário que pode ser utilizado em situações de falha total de uma ou de todas as sirenes, bem como durante manutenções que exijam o desligamento completo desses equipamentos. Desenvolvido exclusivamente para uso em veículos, o sistema possui uma corneta com fixação magnética e uma maleta de controle responsável pela seleção do toque mais adequado à situação desejada.

Além disso, o equipamento mantém a eficiência na propagação do som mesmo com o veículo em deslocamento de até 90 km/h, sem comprometer o alcance e a qualidade do alerta sonoro.

Da mesma forma que as sirenes de emergência, o sistema de alerta secundário passou pelas mesmas adaptações alinhadas às particularidades população indígena, visando ampliar a efetividade comunicacional em situações de emergência.



Figura 10 – Sistema de Alerta Secundário – Sirene Móvel.

Para o trabalho de adaptação, foi necessário estabelecer diálogo direto com a comunidade, envolvendo um professor indígena local, responsável pela tradução das mensagens de emergência e pela gravação dos áudios utilizados nas sirenes. A escolha de uma voz conhecida pela comunidade teve papel fundamental no fortalecimento da confiança, da compreensão e da identificação dos indígenas com o sistema de alerta, tornando a comunicação mais acessível e eficiente em situações de risco.

A implementação do sistema bilíngue nas sirenes representa uma importante medida de inclusão e respeito às particularidades socioculturais dos povos indígenas, evidenciando a necessidade de adaptação dos instrumentos de emergência às realidades locais.

Adaptações como essas, fortalecem os processos de prevenção, percepção de risco e proteção coletiva, contribuindo para que a comunidade indígena tenha acesso a mecanismos de alerta compatíveis com sua língua, cultura e formas próprias de organização social.

9. APROXIMAÇÕES, ATIVIDADES E EXERCÍCIOS MOLDADOS

A construção de um plano de ação de emergência funcional depende da dosagem entre o conteúdo técnico e o entendimento deste conteúdo pelas pessoas que são seu alvo e que o compõem. Neste contexto, o esforço técnico em garantir que os elementos de autoproteção possuíssem acessibilidade no idioma *Mebengokré* seria ineficiente sem que isso fosse amplamente divulgado e entendido pela população indígena interessada.

Com isso em mente, o projeto caminha agora em outra direção, alinhado à capacitação do Povo Xikrin, com enfoque em garantir o pleno entendimento do

funcionamento do PAEBM que agora contempla ações pensadas especialmente para eles.

No âmbito do planejamento, as ações de treinamento são divididas em três etapas: **Aproximação, Elaboração e Execução.**

9.1 Aproximação

Para garantir que os momentos de treinamentos pensados possuam quórum e cumpram com o objetivo de orientação em massa da população, a primeira das etapas exige o deslocamento para a habitação indígena, para ouvir e entender o que funciona para a população. Somente assim é possível entender a fundo os costumes do povo para a aprendizagem e replicá-los nas agendas, garantindo que o conteúdo fosse mais facilmente entendido e absorvido.

Colocar os pés no território e ouvir, de forma ativa, com tempo e intenção, cria conexão e aproxima empreendedor e comunidade, sendo um importante passo rumo à licença social de uma operação.

9.2 Elaboração

Para o desenho da estratégia de capacitação do Povo Xikrin, é preciso pensar em como o conteúdo pode ser traduzido para que funcione numa dinâmica de treinamento que propicie o aprendizado e a prática, tal como é feito para outras comunidades não-tradicionais e empregados.

Nesta etapa, um forte contribuinte é o poder público e suas divisões de promoção do direito indígena que facilitam o acesso a lideranças e professores indígenas que contribuam para a construção de um conteúdo de fácil entendimento e integralmente no idioma do povo.

No campo teórico, o treinamento é pensado para contemplar grande parte do conteúdo que é amplamente trabalhado nos treinamentos de PAEBM, mas de forma a reduzir seu tempo de execução e simplificar termos que não são comumente utilizados no idioma da comunidade. O conteúdo então contempla:

1. O que é uma barragem?
2. Quais são as barragens da nossa mina?
3. O que é PAEBM?
4. O que é ZAS?
5. Sistema de Alerta Sonoro de Emergência.
6. Sistema de Sinalização de Emergência.

Ainda na etapa de elaboração, entende-se que apenas a conceitualização dos termos e entendimentos do PAEBM não faz sentido numa lógica de aprendizado de uma população onde culturalmente as atividades envolvem movimentação e prática de campo. Sendo assim, a última etapa da capacitação é pensada justamente como um teste prático de emergência, onde a população pode aplicar no campo o aprendido.



Figura 11 – Membros do Povo Indígena recebendo treinamento.

O exercício prático de evacuação dos indígenas é realizado logo após a capacitação teórica, fortalecendo os conhecimentos enquanto ainda frescos no consciente do povo.

9.3 Execução

Na etapa de execução as atividades ganham forma em rotinas pensadas e adequadas ao calendário da coleta, pensando nos horários mais oportunos para sua realização sem que afete diretamente o trabalho da coleta das castanhas, caça ou rotinas culturais do povo.

Neste momento, é mobilizada uma infraestrutura que possa suportar e facilitar a didática, como telões para repasse de imagens que tornam o treinamento mais lúdico, cadeiras e mesas para acomodações dos participantes, água e comida para alimentação durante o evento e demais equipamentos que adequam e propiciam o local para o exercício.

A apresentação é conduzida pela equipe de PAEBM da unidade e pelo órgão público responsável pela promoção do direito dos indígenas, em parceria com um membro da própria comunidade, que vai traduzindo de forma simultânea para que os demais presentes, sobretudo aqueles não-falantes da língua possam entender o conteúdo.

O momento é preparado e pensado para ser um espaço de diálogo aberto e transparente, trazendo a comunidade para ainda mais perto e criando cultura através da conversa, integração e proximidade.

Quando certos de que o conteúdo foi absorvido e compreendido, passamos então para a etapa do teste prático, que consiste na solicitação de acionamento das sirenes de emergência da área de confluência com os trajetos indígenas e a realização do processo de evacuação de forma ordeira e orientada.

Ao chegar no ponto de encontro, uma nova rodada de conversa se inicia, para entender se o procedimento foi compreendido e concluído conforme o pensado.

A junção da teoria com a prática fomenta o aprendizado em suas diferentes versões, propiciando um ambiente onde o conhecimento absorvido através da fala - ainda que impactado pela barreira linguística - é aliado direto da aplicação prática já natural desta comunidade.



Figura 12 – Membros do Povo Indígena recebendo treinamento.

10. CONSTRUÇÃO DA CULTURA DE SEGURANÇA DOS POVOS INDÍGENAS COMO FERRAMENTA DE SUSTENTABILIDADE DO NEGÓCIO

Como trazido neste artigo, a percepção de que a comunidade ao redor é um *stakeholder* de extrema importância para um empreendimento é um imperativo necessário e de ganhos claros para a empresa.

Quando elevamos à discussão a comunidades tradicionais, esse discurso toma uma nova forma, onde para além da importância estratégica para a empresa, a manutenção da vida e da cultura dessa população se torna diretamente associada ao empreendedor. Garantir a segurança desses povos é pensar na prevenção de riscos operacionais e socioambientais, bem como respeitar os direitos humanos e pensar em condições mínimas de vida e permanência.

Pensar em ações de emergência direcionadas e adaptadas para contemplar um público que, pela própria história foi invisibilizado é – de certa forma – pensar em formas de garantir que a vida, cultura e costumes deste povo sejam recompensados, manutenidos e possam vigorar, em segurança.

A promoção da cultura de segurança do Povo Indígena Xikrin é mais que um valor humano, é um valor estratégico que destrava o real potencial do negócio.

11. CONCLUSÃO

A experiência apresentada neste artigo demonstra que a gestão da segurança de barragens em contextos que envolvem comunidades indígenas exige muito mais do que a simples replicação de modelos técnicos convencionais. A adaptação dos elementos de autoproteção e evacuação do PAEBM para o Povo Indígena Xikrin do Cateté evidenciou que a efetividade das ações de emergência está diretamente associada à compreensão das dinâmicas culturais, linguísticas e territoriais da comunidade envolvida.

Os resultados obtidos a partir do levantamento socioeconômico adaptado, da implementação de sinalizações e sistemas de alerta bilíngues, bem como das ações de capacitação moldadas à realidade indígena, reforçam que a comunicação clara, o diálogo contínuo e a participação ativa da comunidade são fatores determinantes para o fortalecimento da percepção e gestão de riscos. Além disso, tais iniciativas contribuem para a construção de uma cultura de segurança compartilhada, baseada no respeito mútuo e na confiança entre empreendimento e comunidade.

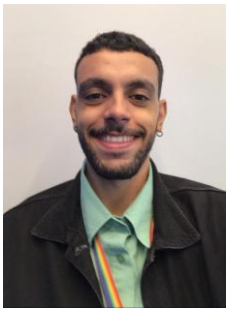
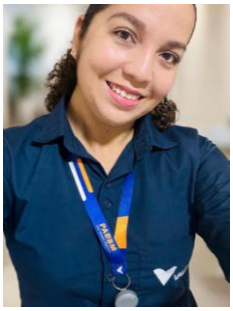
A promoção da segurança de povos indígenas em áreas de influência de barragens de mineração não representa apenas um mero cumprimento de licença ou operação, mas um compromisso ético e estratégico. Ao integrar a proteção da vida e da cultura indígena às práticas de gestão de riscos, o empreendimento fortalece sua licença social para operar e contribui para a sustentabilidade de longo prazo do negócio, reafirmando que segurança, respeito cultural e desenvolvimento podem e devem caminhar de forma integrada.

12. PALAVRAS-CHAVE

Segurança de barragens; Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração; Povos Indígenas; Zona de Autossalvamento; Comunicação de Emergência.

13. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL – ISA (s.d.) – “Demografia – Terras Indígenas no Brasil”, base de dados on-line sobre terras indígenas, tema: demografia indígena, Instituto Socioambiental, Brasil.

	**Kayto FIGUEIREDO** Natural de Mariana, em Minas Gerais é estudante de Geografia, integra a equipe da Vale Metais Básicos a cerca de 05 anos e atualmente coordena os Planos de Ação de Emergência das Barragens de Salobo e Sossego. Profissional dedicado à gestão e gerenciamento de equipe e ações voltadas para a documentação, testagem e exercício dos PAEBMs.
	**Lívia MIRANDA** Natural de Arapoema, no Tocantins. Gestora Ambiental, integrante da Vale Metais Básicos há mais de 05 anos e desde 2022 atua como Técnica de Emergência no PAEBM. Responsável pelo pilar de operacionalização, que engloba os sistemas de alerta e a sinalização de emergência. Constantemente busca o aprimoramento dedicando-se ao desenvolvimento de conhecimentos que contribuam para o atendimento às legislações, fortalecendo a escuta ativa e o engajamento com a sociedade.
	**Umenia LIMA** Natural de Parauapebas no Pará, casada e formada em Administração, atua há seis anos na Vale Metais Básicos e, desde 2022, trabalha na área de PAEBM em Salobo. Responsável pelas atividades de gestão, organização e apoio às ações relacionadas à segurança e prevenção de emergências.

	**Carlos LIMA** Natural de Marabá, no Pará, é Mestre em Geologia pela UFPa, Especialista em Geotecnia e Segurança de Pilhas e Barragens pela UFOP. Atualmente, atua como Gerente de Geotecnia e RTFE na Vale Metais Básicos, responsável pelas estruturas geotécnicas da Mina de Salobo.
	**Hugo CAMPELO** Natural de Bragança no Pará com Especialização em Sistema Minero-Metalurgico com Ênfase em Cobre pela UFOP, Engenheiro de Minas pela UFPA, Atua como Gerente Geral de Serviços Técnicos na Vale Metais Básicos na Mina do Salobo.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

IMPLANTAÇÃO DE GRADES ANTICARDUMES COMO BOA PRÁTICA AMBIENTAL NA OPERAÇÃO DA UHE BELO MONTE

Taís SILVA DE JESUS
Especialista Socioambiental - Norte Energia

Roberto LEANDRO DA SILVA
Gerente de Meios Físico e Biótico - Norte Energia

Bruno GONÇALVES BAHIANA
Superintendência Socioambiental e do Componente Indígena - Norte Energia

Renê Eiji SOUZA HOJO
Consultor Sênior Especialista - Ichthyology Consultoria Ambiental

Valéria Fernanda SARACURA
Consultora Autônoma – QCA Ltda

RESUMO

A incorporação de soluções tecnológicas aos protocolos operacionais representa avanço na gestão ambiental de barragens hidrelétricas, como na UHE Belo Monte, no rio Xingu (PA), com capacidade instalada de 11.233,1 MW e geração média de 4.571 MW, composta por duas Casas de Força, sendo a Principal com 18 unidades tipo Francis e a Complementar com seis tipo Bulbo. Durante o comissionamento e as fases iniciais, o monitoramento ambiental identificou mortes de peixes associadas às manobras das unidades geradoras, indicando a necessidade de medida mitigadora. Como resposta, entre 2018 e 2019, foram implantados 36 conjuntos de grades anticardumes nos tubos de sucção, dois por unidade, com malha de 20 x 20 mm, operando de forma automatizada e integrada à rotina operacional. A comparação entre o período de Carga Restrita (2016–2018) e o de Plena Carga (2019–2025) evidenciou redução de 94% no número de indivíduos e de 79% na biomassa de peixes perecidos. Os resultados demonstram que a integração entre engenharia operacional e monitoramento ambiental contínuo constitui prática eficaz e replicável para mitigação de impactos em usinas hidrelétricas, com acompanhamento sistemático pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

ABSTRACT

The incorporation of technological solutions into operational protocols represents an advance in the environmental management of hydroelectric dams, as observed at the Belo Monte Hydroelectric Power Plant, located on the Xingu River (Pará, Brazil), with an installed capacity of 11,233.1 MW and an average generation of 4,571 MW,

comprising two Powerhouses: the Main powerhouse with 18 Francis-type generating units and the Complementary powerhouse with six Bulb-type units. During commissioning and early operational phases, environmental monitoring identified fish deaths associated with generating unit maneuvers, indicating the need for a mitigation measure. In response, between 2018 and 2019, 36 fish-exclusion screen sets were installed in the draft tubes, two per unit, with a 20 × 20 mm mesh, operating automatically and integrated into the operational routine. Comparison between the Restricted Load period (2016–2018) and the Full Load period (2019–2025) showed a 94% reduction in the number of individuals and a 79% reduction in fish biomass mortality. The results demonstrate that the integration of operational engineering and continuous environmental monitoring is an effective and replicable practice for mitigating impacts in hydroelectric plants, with systematic oversight by the Brazilian Institute of Environment and Renewable Natural Resources (IBAMA).

1. INTRODUÇÃO

A implantação de aproveitamentos hidrelétricos pode ocasionar modificações na comunidade ictiofaunística, tanto nas etapas de construção e formação dos reservatórios, devido à alteração do regime hídrico, quanto na fase de operação, em função da movimentação de comportas, vertimento e funcionamento das unidades geradoras, podendo resultar em injúrias ou mortes de peixes.

A mortalidade de peixes em usinas hidrelétricas é registrada desde as décadas de 1970 e 1980, sendo amplamente reconhecida como um dos principais impactos associados a esse tipo de empreendimento. Diante disso, o Setor Elétrico Brasileiro tem avançado na adoção de boas práticas ambientais, impulsionado pelo fortalecimento da legislação ambiental e pela necessidade de aprimorar a gestão desses impactos **[1]**.

O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) da UHE Belo Monte já previa impactos sobre a ictiofauna em todas as fases de implantação e operação do empreendimento, considerando sua configuração singular, composta por duas Casas de Força: a Casa de Força Principal (Belo Monte), com 18 Unidades Geradoras (UGs) do tipo Francis, com potência unitária de 611,11 MW, e a Casa de Força Complementar (Pimental), com seis UGs do tipo Bulbo, com potência unitária de 38,85 MW.

Os projetos de monitoramento da ictiofauna em empreendimentos hidrelétricos têm demonstrado que eventos de mortalidade de peixes estão associados tanto a fatores estruturais, relacionados ao projeto e à operação das usinas, quanto a fatores biológicos, como a composição e abundância das espécies nas áreas adjacentes. Durante as fases de comissionamento, operação e manutenção das unidades geradoras, os peixes podem sofrer injúrias ou mortalidade por diferentes mecanismos **[2,3]**. Entre as principais situações de risco destacam-se partidas de unidades, giros a vazio, drenagens, variações de carga e testes eletromecânicos, além de operações como vertimento de vazões excedentes e deplecionamento de reservatórios **[4]**.

Os processos de injúria e mortalidade podem ocorrer tanto pelo contato direto com estruturas físicas, como turbinas e vertedouros, quanto pelas condições hidrodinâmicas geradas pela operação da usina. A magnitude desses impactos depende de múltiplos fatores, incluindo o desenho do empreendimento, os procedimentos operacionais, as características da ictiofauna regional e a abundância de indivíduos nas proximidades, fortemente influenciada pela sazonalidade [2]. Durante os períodos de enchente e cheia, ocorre maior concentração de peixes, especialmente espécies migradoras e reofílicas, associada ao período reprodutivo conhecido como piracema, quando há maior vulnerabilidade a eventos de mortalidade.

Diante desse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento e a implementação de medidas de prevenção, mitigação e compensação dos impactos sobre a fauna

aquática. Nesse cenário, destacam-se as ações adotadas pela Norte Energia S.A., especialmente a implantação de grades anticardumes como medida de proteção. Essas estruturas têm apresentado resultados positivos e consistentes, sendo reconhecidas na literatura como estratégias eficazes para a redução da mortalidade de peixes em empreendimentos hidrelétricos **[3]**.

1.1 Objetivo

Avaliar a eficiência do sistema de grades anticardumes implementadas para impedir ou minimizar o acesso de peixes ao interior do tubo de sucção durante as mudanças do estado operativo das unidades geradoras da Casa de Força Principal da UHE Belo Monte.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A área considerada corresponde à Usina Hidrelétrica Belo Monte, instalada no rio Xingu (Figura 1), no Estado do Pará, composta por duas Casas de Força com características operacionais distintas. A Casa de Força Principal (Belo Monte), foco das análises, possui 18 Unidades Geradoras (UGs) do tipo Francis, com potência unitária de 611,11 MW, totalizando aproximadamente 11.000 MW de capacidade instalada. Já a Casa de Força Complementar (Pimental) é composta por seis unidades geradoras do tipo Bulbo-Kaplan, com eixo horizontal, totalmente submersas e projetadas para operação em baixa queda, com capacidade instalada total de aproximadamente 233 MW.

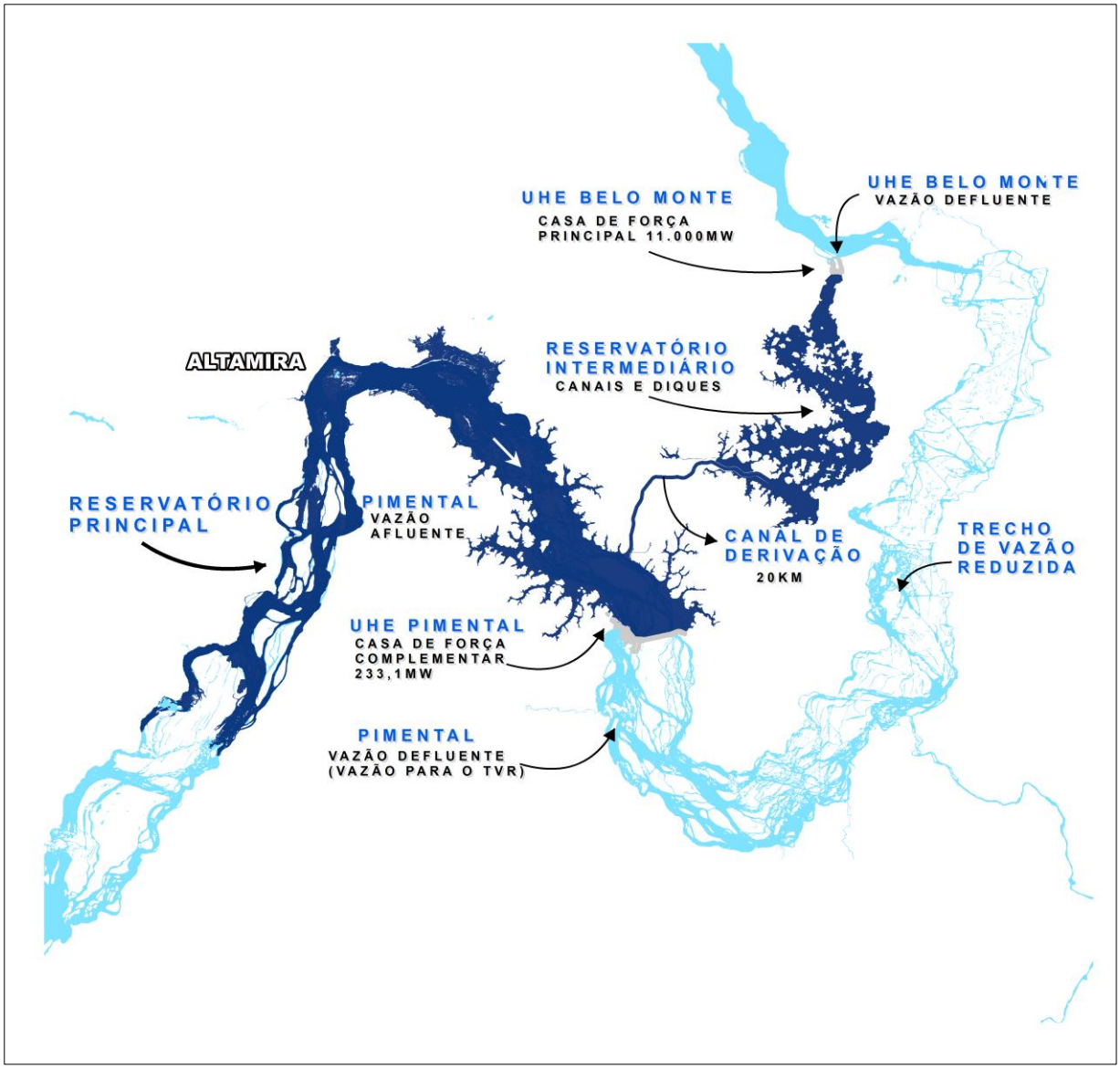


Figura 1 - Representação esquemática do arranjo geral da UHE Belo Monte no rio Xingu, destacando o Reservatório Principal, Reservatório Intermediário, Canal de Derivação, Trecho de Vazão Reduzida (TVR), e as estruturas das casas de força das UHE Pimental e Belo Monte, com indicação dos sentidos de vazão afluente e defluente do sistema hidrelétrico.

2.2 Delineamento

Considerando que as unidades geradoras do tipo Francis, presentes na Casa de Força Principal, são reconhecidas pelo maior potencial de causar injúrias e mortalidade de peixes em função de suas características hidráulicas e operacionais, a avaliação da eficácia das grades anticardumes foi conduzida com foco nesse ambiente.

Para isso, foi adotada uma abordagem comparativa entre dois períodos operacionais distintos: (i) período de Carga Restrita (2016–2018), caracterizado pela ausência das grades, e (ii) período de Plena Carga (2019–2025), após a instalação e incorporação

das estruturas à rotina operacional. Essa estratégia permitiu avaliar as variações nos registros de mortalidade de peixes associadas à implementação da medida mitigadora.

2.3 Monitoramento da ictiofauna

O monitoramento da ictiofauna foi conduzido de forma contínua, por meio de inspeções diárias embarcadas no Canal de Fuga e no Trecho de Restituição de Vazão. As varreduras com sonar de pesca foram realizadas em seis trechos do canal de fuga e um no trecho de restituição, por meio de leituras lineares com duração aproximada de quatro minutos, sendo a abundância estimada pela contagem do número total de peixes registrados.

Durante o acompanhamento, todos os peixes perecidos nos trechos amostrados foram recolhidos para quantificação do número de indivíduos e da biomassa. Em seguida, procedeu-se à coleta das seguintes informações: localização, horário, identificação taxonômica, comprimento padrão e comprimento total (cm), biomassa (kg) e condições dos indivíduos, incluindo tipo de lesão física e presença de barotrauma, visando analisar sua relação com a operação das unidades geradoras.

2.4 Análise dos dados

A análise dos dados consistiu na comparação dos registros de mortalidade entre os períodos antes e depois da instalação das grades anticardumes, utilizando como métricas principais o número de indivíduos e a biomassa total. A eficácia da medida foi avaliada a partir da variação percentual desses indicadores, permitindo quantificar a redução associada à implantação das estruturas.

2.5 Sistema de grades anticardumes

Em 2018, foram instalados 36 conjuntos de grades anticardumes nas 18 unidades geradoras da Casa de Força Principal, sendo dois conjuntos por unidade, posicionados nos vãos de saída dos tubos de sucção, denominados Vão “A” (margem esquerda) e Vão “B” (margem direita). As grades foram instaladas nas mesmas ranhuras destinadas às comportas ensecadeiras de jusante (stop-log) (Figura 2).

Cada conjunto apresenta dimensões aproximadas de 13,10 m de largura por 12,60 m de altura e é composto por quatro painéis (inferior, intermediário inferior, intermediário superior e superior). As estruturas são constituídas por malha de aço inoxidável com abertura de 20 × 20 mm, dimensionada para compatibilizar a diversidade e o porte da ictiofauna local, atuando como barreira física de exclusão (Figura 3).

O sistema opera de forma automatizada, sendo movimentado por guinchos fixos acionados por motores elétricos, com alimentação proveniente do Centro de Controle de Motores da Unidade (CCMU), em 460 V, por meio de inversores de frequência. O tempo médio de fechamento das grades é de aproximadamente cinco minutos, permitindo sua integração às manobras operacionais da usina.

Destaca-se que o desempenho e o acompanhamento do sistema são realizados em conjunto com a equipe de acompanhamento ambiental e resgate da ictiofauna, por meio de comunicação contínua com a equipe de campo e da elaboração de instruções de processo. Nesse contexto, há interação contínua com as equipes de operação e manutenção (O&M) e meio ambiente.

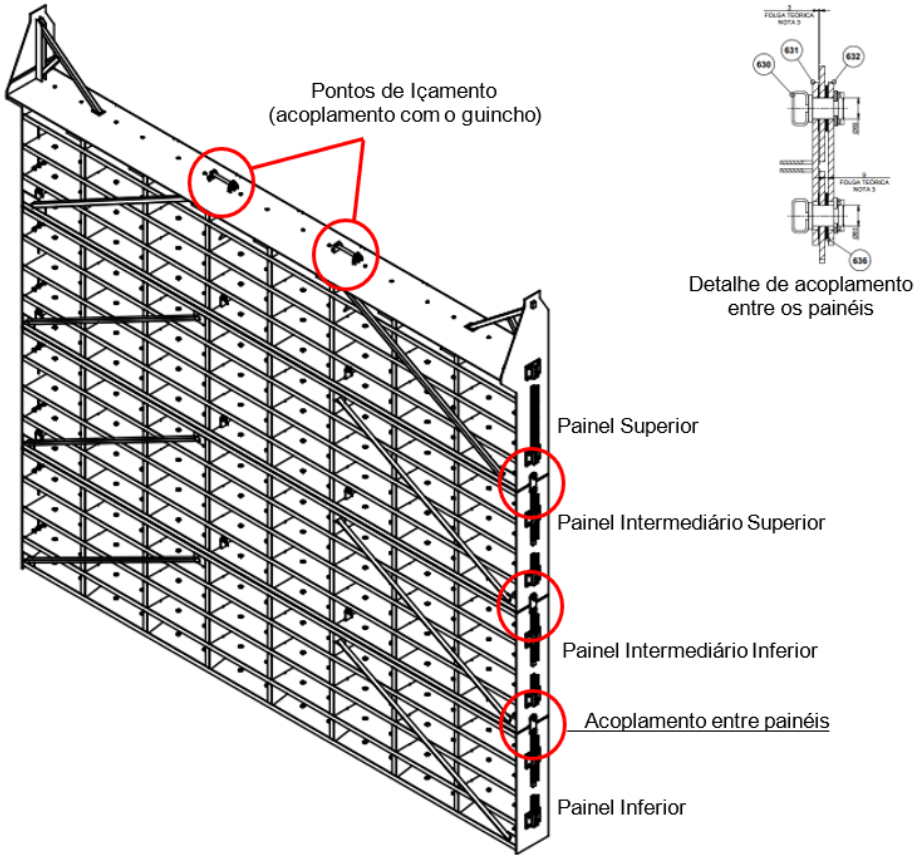


Figura 2 - Detalhamento esquemático dos painéis que compõem a grade anticardumes, destacando o acoplamento entre os módulos (painel inferior, intermediários e superior).

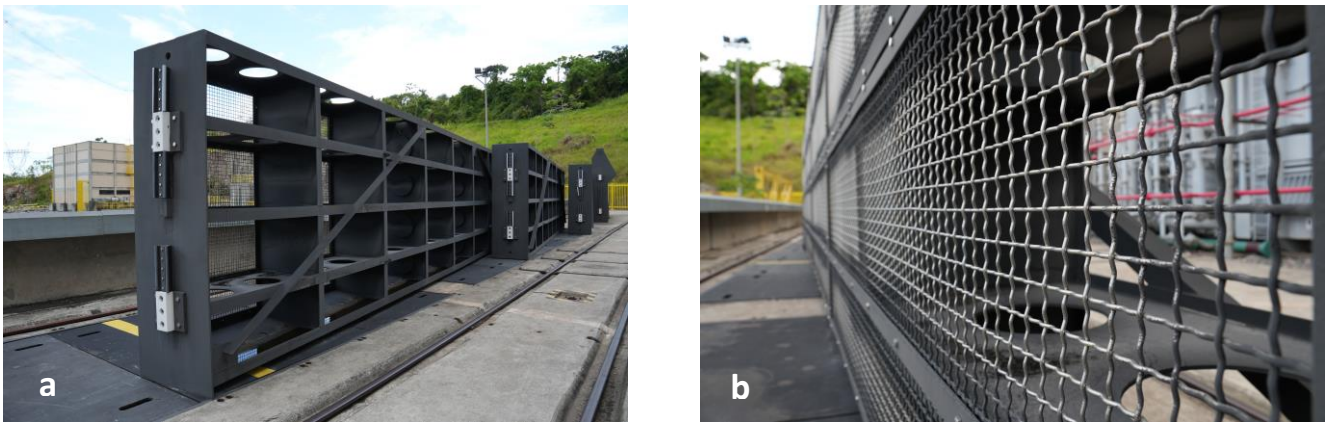


Figura 3 - (a) Vista geral de um conjunto de grades anticardumes instalado na Casa de Força Principal; (b) detalhe da malha de aço inoxidável com abertura de 20 × 20 mm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Barreiras físicas podem ser importantes ferramentas para evitar a presença de peixes em áreas de potencial risco de impacto em usinas hidrelétricas. As barreiras físicas mais comuns são as grades ou telas, que podem ser utilizadas na saída do tubo de sucção a jusante do barramento, evitando a entrada de peixes a partir do canal de fuga. Sistemas de grades para peixes (também denominadas anticardumes) passaram a ser utilizados e consistem na proteção mais efetiva para reduzir o acesso dos peixes, a partir do canal de fuga, aos pontos de risco durante manobras de partida, parada e drenagem das UGs **[3]**.

No caso da UHE Belo Monte, a partir da implantação das grades anticardumes, em dezembro de 2018, observou-se redução expressiva nos registros de peixes perecidos a jusante, no canal de fuga (Figura 4). A avaliação entre o período anterior à instalação das grades (fase de carga restrita) e o período subsequente (fase de plena carga) evidencia uma redução de 94% no número de indivíduos e de 79% na biomassa de peixes perecidos.

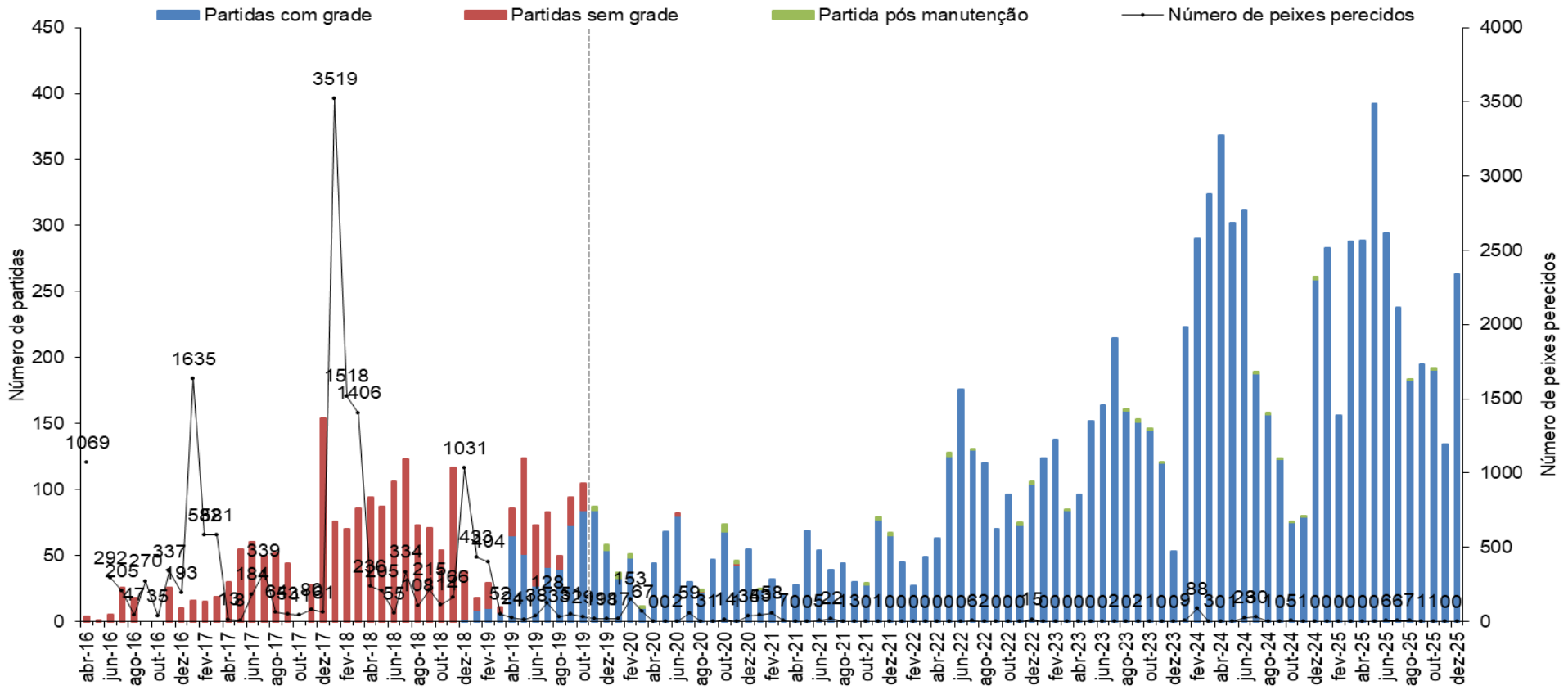


Figura 4 - Número de partidas de unidades geradoras (eixo primário) ocorridas no período de abril de 2016 a dezembro de 2025. Barras vermelhas: sem grades anticardumes; Barras verdes: partidas pós manutenção; Barras azuis: partidas com grades anticardumes e Linha e pontos pretos: número de peixes perecidos (eixo secundário). A linha pontilhada indica a divisão entre os períodos de Carga Restrita (04/2016 a 10/2019) e Carga Plena (11/2019 a 12/2025.

A exemplo da eficiência de grades anticardumes em UHEs no Brasil, destacam-se as instaladas na UHE Três Marias, localizada no rio São Francisco (MG). Foram analisadas 385 partidas/paradas de unidades geradoras (159 sem grades e 226 com grades) **[3]**. A biomassa de peixes mortos ou moribundos recolhida no canal de fuga após a partida das unidades sem grades variou de 0 a 120 kg por evento, totalizando 828 kg. Com o uso das grades, a biomassa variou de 0 a 8 kg, totalizando 23 kg, o que representa uma eficácia de 97%. O sucesso dessa medida na UHE Três Marias estimulou sua adoção em outros empreendimentos, como as UHEs Funil (Rio Grande, MG) e Retiro Baixo (Rio Paraopeba, MG) **[5]**.

Essa tendência também se confirma na análise dos meses de novembro e dezembro de 2025, quando comparados ao mesmo período entre 2016 e 2018, correspondente ao início da piracema. Mesmo em um contexto de maior concentração de cardumes, associado ao comportamento migratório e reprodutivo das espécies, verificou-se redução de 100% nos eventos de mortalidade nesses meses específicos, com ausência de registros no período avaliado.

Ressalta-se ainda que as partidas das unidades geradoras são realizadas somente mediante a disponibilidade das grades anticardumes, que operam de forma automatizada. Os resultados obtidos indicam elevada eficiência dessas estruturas como medida de mitigação, evidenciando sua relevância para a redução de impactos e para a conservação da ictiofauna do rio Xingu a jusante da UHE Belo Monte.

Além dessa medida estrutural e desenvolvimento de procedimentos operacionais das grades anticardumes integrados (operação e área socioambiental), outras ações operacionais vêm sendo implementadas de forma complementar, com o objetivo de potencializar a mitigação de impactos associados à operação das unidades geradoras. Nesse contexto, são adotados procedimentos específicos durante as partidas e paradas das UGs, uma vez que peixes presentes no tubo de sucção podem sofrer injúrias ou mortalidade por choques físicos nas pás ou nas paredes do tubo. Destaca-se, entre as manobras, aquela denominada “Espanta Peixe”, que consiste no aumento gradual da rotação e do fluxo da unidade, realizada de forma manual, favorecendo a saída de indivíduos eventualmente presentes no interior do tubo de sucção. Como aprimoramento operacional, em 2025 foi implementado o modo de “Partida Lenta”, que automatiza esse procedimento, passando a realizar a partida das unidades de forma gradual pelo sistema de controle. Adicionalmente, medidas complementares também são aplicadas, como a instalação dos *stop logs* no mesmo dia após paradas para manutenção, contribuindo para reduzir a possibilidade de entrada de peixes no tubo de sucção.

De forma integrada a essas iniciativas, destaca-se ainda que, no âmbito do Projeto Básico Ambiental (PBA) e do Plano Básico Ambiental do Componente Indígena (PBA-CI), é implementado um conjunto abrangente de ações de prevenção, mitigação e compensação, que beneficiam diretamente a conservação da ictiofauna. Entre essas ações, incluem-se: a destinação de recursos à compensação ambiental voltada à proteção e manutenção de sítios reprodutivos e de alimentação da fauna; o

desenvolvimento de projetos experimentais com foco na reprodução de espécies nativas do rio Xingu e de interesse social; a implantação de laboratórios de ecologia e reprodução de peixes na UFPA; a recomposição da vegetação em Áreas de Preservação Permanente (APP), contribuindo para a manutenção de habitats essenciais; o fortalecimento de atividades produtivas de subsistência junto a famílias indígenas, ribeirinhas e pescadores; a manutenção do Sistema de Transposição de Embarcação (STE) e o apoio à navegabilidade; a execução de ações de saneamento; a implantação de infraestrutura de comunicação; além da implantação e monitoramento do Sistema de Transposição de Peixes (STP) e do início das ações da Proposta de Trabalho Integrado da Pesca, entre outras iniciativas voltadas ao desenvolvimento local das populações da Volta Grande do Xingu.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos após a instalação das grades anticardumes, em dezembro de 2018, na UHE Belo Monte, demonstram elevada eficiência como medida de mitigação, evidenciando sua relevância para a redução de impactos e para a conservação da ictiofauna do rio Xingu a jusante da usina. Além da instalação física das grades, protocolos operacionais que têm sido desenvolvidos no âmbito da UHE Belo Monte demonstraram eficácia na gestão dos impactos causados pelas estruturas da Casa de Força Principal durante a operação da Usina.

Por fim, destaca-se que a divulgação de estudos, pesquisas e resultados por parte das concessionárias, como a Norte Energia, acerca das manobras operativas dos empreendimentos em relação ao comportamento da comunidade de peixes é essencial para a ampliação do conhecimento no setor elétrico, contribuindo para a adoção de medidas eficazes de proteção e conservação da ictiofauna, bem como para o fomento de pesquisas que viabilizem novos empreendimentos e a expansão do setor hidrelétrico de forma sustentável.

5. PALAVRAS-CHAVE

barragens; prática ambiental; ictiofauna; mitigação; grades anticardumes

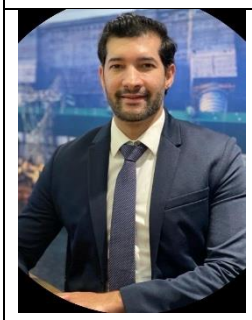
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LOURES, R. C. (2022) – Programa Peixe Vivo: 15 anos. Belo Horizonte, MG: CEMIG.

[2] AGOSTINHO, A. A.; GOMES, L. C.; PELICICE, F. M. (2007) – Ecologia e manejo de recursos pesqueiros em reservatórios do Brasil. Maringá: EDUEM.

[3] ANDRADE, F.; PRADO, I. G.; LOURES, R. C.; GODINHO, A. L. (2012) – "*Evaluation of techniques used to protect tailrace fishes during turbine maneuvers at Três Marias Dam, Brazil*". Neotropical Ichthyology, v. 10, n. 4, p. 723–730.

[4] LOURES, R. C.; GODINHO, A. L. (2016) – Avaliação de risco de morte de peixes em usinas hidrelétricas. Belo Horizonte: Companhia Energética de Minas Gerais.

	**Taís SILVA DE JESUS** Graduada em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Pará (UFPA) (2016) e mestre em Biologia de Água Doce e Pesca Interior pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) (2020), possui experiência de quase 10 anos em projetos de ictiofauna em grandes empreendimentos hidrelétricos. Atualmente é Especialista Socioambiental na Norte Energia.
	**Roberto LEANDRO DA SILVA** Biólogo e mestre em ecologia e produção sustentável. Mais de 20 anos de experiência na gestão e execução de monitoramentos e mitigações socioambientais em projetos estruturantes do setor elétrico. Atua na Norte Energia desde 2013, atualmente é Gerente de Meios Físico e Biótico, ligado a mais de 40 projetos, que atendem às condicionantes do licenciamento da UHE Belo Monte.
	**Bruno GONÇALVES BAHIANA** Engenheiro Agrícola e Ambiental pela UFF, com pós-graduação em MBA em Petróleo, Gás e Energia (UVA) e em Antropologia (Unyleya). Mestre em Biodiversidade e Conservação (UFPA). Possui formação complementar pelo MIT, Harvard e FGV, e atua há mais de 15 anos no gerenciamento, avaliação e monitoramento de projetos socioeconômicos e ambientais no setor de energia. Atualmente, é Superintendente Socioambiental e do Componente Indígena da Norte Energia.
	**Renê Eiji SOUZA HOJO** Graduado em Ciências Biológicas pela PUC/MG (2002) e mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Zoologia de Vertebrados da PUC/MG (2005). Atua como consultor sênior, especialista na coordenação de projetos com abrangência nos seguintes temas: ictiofauna, pesca, limnologia, manejo e conservação de recursos ictiofaunísticos em usinas hidrelétricas e mineração.
	**Valéria Fernanda SARACURA** Graduada em Zootecnia, com mestrado em Ciência Animal e doutorado em Biologia Animal, possui mais de 30 anos de experiência nas áreas de licenciamento ambiental, gestão ambiental, manejo e conservação de animais silvestres e de áreas protegidas, pela Quatipuru Consultoria Ambiental Ltda.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

MODELAGEM APLICADA À AVALIAÇÃO DE IMPACTO VISUAL EM PROJETOS GEOTÉCNICOS

Maíra REIS
Engenheira Ambiental/Geotécnica - Pimenta de Ávila Consultoria

Giani ARAGÃO
Engenheira Ambiental/Geotécnica - Pimenta de Ávila Consultoria

Luan COSTA
Engenheiro Ambiental - Profissional Independente

Carine LIMA
Engenheira Ambiental - Pimenta de Ávila Consultoria

RESUMO

A expansão e a intensificação das atividades minerárias nas últimas décadas têm ampliado a necessidade de infraestruturas de apoio nos empreendimentos, como pilhas de rejeitos, de estéril e barragens, as quais correspondem a elementos artificiais na paisagem. Historicamente, o planejamento dessas estruturas priorizou aspectos geotécnicos e operacionais. Contudo, o avanço das discussões sobre sustentabilidade, governança e responsabilidade socioambiental evidencia que a integração desse tipo de estrutura com a paisagem local deve ser considerada como critério relevante, desde o planejamento, especialmente em contextos de crescente proximidade entre áreas minerárias e urbanas.

O impacto visual resulta da alteração da percepção da paisagem, influenciada por fatores como escala, forma, contraste, visibilidade e permanência das estruturas. Se não tratado de forma antecipada, pode intensificar conflitos sociais, comprometer a aceitação do empreendimento e dificultar a obtenção/manutenção da licença social para operar. Assim, a realização de estudos de impacto visual deve fazer parte da avaliação de alternativas locacionais e geométricas, subsidiando as tomadas de decisões. Neste contexto, o uso de ferramentas de geoprocessamento contribui para a compreensão da relação entre estruturas geotécnicas e paisagem, uma vez que permitem simulações, identificação de áreas sensíveis e análise da exposição visual a partir de locais com ocupação humana, auxiliando na proposição de soluções que minimizem os impactos e favoreçam a integração territorial.

ABSTRACT

The expansion and intensification of mining activities over recent decades have increased the need for supporting infrastructure within mining operations, including artificial structures in the landscape such as tailings or waste rock piles, and dams. Historically, the planning of these structures has prioritized geotechnical and operational aspects. However, the advancement of discussions on sustainability, governance, and socio-environmental responsibility highlights that the integration of such structures with the local landscape should be considered a relevant criterion since the planning stage, especially in contexts of increasing proximity between mining and urban areas.

Visual impact results from changes in landscape perception, influenced by factors such as scale, shape, contrast, visibility, and the permanence of structures. When not addressed proactively, this impact may intensify social conflicts, compromise project acceptance, and interfere the achievement/maintenance of the social license to operate Thus, conducting visual impact studies is essential for evaluating locational and geometric alternatives, supporting decision-making processes. In this context, the use of geoprocessing tools contributes to understanding the relationship between geotechnical structures and the landscape, as they enable enable simulations, the identification of sensitive areas, and the assessment of visual exposure from locations with human occupation, supporting the development of solutions that minimize impacts and promote territorial integration.

1. INTRODUÇÃO

A transformação da paisagem é um aspecto inerente das atividades humanas, podendo resultar em alterações significativas na configuração do território, que influenciam diretamente a percepção do ambiente por parte das comunidades situadas no entorno e a aceitação social dos projetos. No contexto minerário, tais transformações possuem grande associação à implantação de estruturas geotécnicas de grande porte, como barragens e pilhas.

Embora historicamente o impacto visual tenha sido tratado de forma secundária, o fortalecimento das práticas de sustentabilidade e governança tem ampliado a necessidade de considerá-lo como elemento no processo de avaliação de impactos ambientais.

Nesse sentido, metodologias consolidadas internacionalmente, como aquelas propostas pelo *Bureau of Land Management* (BLM) [1], [2] e [3], dos Estados Unidos, bem como por uma parceria entre o *Landscape Institute* e o *Institute of Environmental Management & Assessment* (IEMA) [4], do Reino Unido, fornecem bases conceituais robustas para a avaliação de impactos visuais, destacando a necessidade de integrar análises objetivas (visibilidade e características físicas das estruturas) e subjetivas (percepção humana).

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma abordagem estruturada para avaliação de impactos visuais associados a projetos geotécnicos, com ênfase no uso de ferramentas de geoprocessamento como suporte à análise de visibilidade, subsidiando a tomada de decisão, a proposição de medidas de mitigação e o adequado gerenciamento de alterações paisagísticas ao longo do ciclo de vida das referidas estruturas.

2. TRANSFORMAÇÕES DA PAISAGEM ASSOCIADAS ÀS ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS DA MINERAÇÃO

A mineração é uma atividade indissociável da transformação da paisagem, uma vez que envolve a movimentação de elevados volumes de materiais e a construção de estruturas artificiais de grande porte.

Ao longo dos tempos, a demanda por minerais, em escala global, sempre observou uma tendência de crescimento e hoje, para além da expansão, observa-se também um movimento de transformação.

A transformação avança, de forma combinada, em duas direções diferentes e complementares: a primeira possui relação direta com a transição energética, que tende a provocar um crescimento expressivo na demanda por minerais estratégicos; já a segunda conduz a uma mineração cada vez mais alinhada aos conceitos de sustentabilidade e governança, tão ansiados pela sociedade.

Por sua vez, a necessidade de expansão das atividades minerárias implica diretamente em aumento da escala das estruturas geotécnicas de disposição de estéreis e rejeitos. Somado ao aumento da demanda, tem-se o empobrecimento das

jazidas já em exploração, bem como o comissionamento de jazidas com relação estéril-minério mais desfavorável que aquelas já mineradas, seja pelo esgotamento daquelas com maiores teores, seja pela exploração de minérios que possuem inerentemente maiores proporções de resíduos associados.

Se ao acompanhar o movimento de expansão das atividades minerárias, as estruturas geotécnicas ganham maior expressividade, há grande potencial de que os impactos visuais também aumentem. No entanto, é necessário atender também aos princípios vinculados à transformação. Neste contexto, emerge a necessidade de realização de um eficiente diagnóstico paisagístico na região onde uma estrutura será implantada, de um prognóstico cuidadoso da área considerando a implantação, bem como de tratamento das informações geradas e seu emprego em prol da integração da estrutura com a paisagem, por meio da adoção de medidas de mitigação e do adequado gerenciamento de alterações paisagísticas ao longo de seu ciclo de vida.

3. FUNDAMENTOS E MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS VISUAIS

Diferentemente de outros componentes ambientais tradicionalmente abordados na Avaliação de Impactos Ambientais (AIA), os impactos visuais apresentam natureza essencialmente sensorial, exigindo metodologias específicas que integrem análises espaciais e critérios técnicos à análise da percepção, baseada em elementos de julgamento qualificado. Nos subitens que seguem são apresentados os fundamentos desta análise.

3.1 Impactos Visuais no Contexto da Avaliação de Impactos Ambientais

A legislação brasileira não trata a avaliação e mitigação de impactos visuais como um tema isolado e com parâmetros únicos, mas a incorpora, de forma indireta, no arcabouço do licenciamento ambiental e da proteção da paisagem. A Lei Federal nº 6.938/1981 [5] estabelece o dever de prevenir, controlar e mitigar impactos ambientais, o que inclui alterações na paisagem. No âmbito do licenciamento, a Resolução CONAMA nº 01/1986 [6] exige a identificação e avaliação dos impactos ambientais, o que também inclui efeitos sobre a qualidade visual.

Na prática, a mitigação de impactos visuais é tratada caso a caso nos estudos ambientais, sendo comum a adoção de medidas como o controle de cores e texturas, revegetação, barreiras vegetais e planejamento da disposição de estruturas. Em áreas com valor cultural ou paisagístico reconhecido, como aquelas protegidas pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), podem existir exigências adicionais. Assim, embora não haja uma norma única e específica para impactos visuais, o arcabouço jurídico brasileiro exige sua consideração e mitigação como parte integrante da gestão ambiental e territorial.

Corroborando com o contexto apresentado, instituições como o *U.S. Army Corps of Engineers* [7] e a *Federal Highway Administration* [8] reconhecem a qualidade visual como um componente ambiental relevante, destacando que os estudos de impacto

visual subsidiam decisões locacionais, geométricas e de mitigação por meio da avaliação dos impactos sobre os recursos visuais e a experiência dos observadores.

Como dito, porém, o impacto visual tem natureza sensorial, o que implica em dependência da interação entre o objeto e o observador, e influência por fatores culturais, sociais e contextuais. Essa característica o distingue daqueles sobre outros componentes ambientais contemplados na AIA, exigindo abordagens metodológicas específicas para avaliação, capazes de combinar análises quantitativas e qualitativas, de forma a evitar que receba um tratamento secundário.

3.2 Critérios para a Avaliação da Magnitude de Impactos Visuais

O impacto visual é entendido como a alteração da qualidade perceptiva da paisagem em função de intervenções antrópicas, podendo influenciar diretamente a aceitação social dos empreendimentos, especialmente em contextos de proximidade com áreas urbanas ou de elevado valor cênico.

No caso de estruturas geotécnicas de grande porte, como pilhas e barragens de mineração, tais alterações decorrem, principalmente, de sua volumetria, elevação, geometria e permanência ao longo do tempo, podendo manifestar-se de forma temporária ou permanente, conforme a configuração da estrutura e as características do território em que se insere.

O referido contexto geomorfológico conta muito sobre a magnitude de alterações paisagísticas. Em áreas de relevo plano, as estruturas tendem a apresentar maior visibilidade horizontal, podendo ser observadas a grandes distâncias (Figura 1.a). Por outro lado, em regiões montanhosas, embora a visibilidade possa ser parcialmente restringida, estruturas geotécnicas frequentemente introduzem contrastes notórios na linha do horizonte, alterando o contorno natural da paisagem (Figura 1.b).



Figura 1 – Ilustração da influência do contexto geomorfológico sobre o impacto visual de estruturas de mineração em região plana (a) e em região montanhosa (b). Fonte: Elaborada pelos autores com auxílio de inteligência artificial generativa (OpenAI, ChatGPT/DALL·E), 2026.

Ocorre, no entanto, que a possibilidade de se enxergar um determinado projeto não dá, por si só, notícias acerca da existência ou não de impacto. De forma geral, a avaliação de impactos visuais eventualmente produzidos por um projeto é providenciada por meio de uma avaliação paisagística local, considerando dois status distintos: o ambiente em suas condições originais, sem a implantação do projeto (diagnóstico); e o ambiente após a instalação do projeto (prognóstico).

Existem diferentes abordagens para a verificação da existência e definição da respectiva magnitude de um impacto visual e grande parte delas baseiam-se no conceito de que é resultante da combinação de dois fatores: a **sensibilidade visual**, que está relacionada à percepção que os diferentes observadores têm a respeito do projeto; e o **efeito visual**, associado ao contraste/ integração do projeto em si com a paisagem. Avalia-se separadamente a sensibilidade visual e o efeito visual, e a partir da associação destas duas variáveis, por meio de matriz de avaliação, chega-se à magnitude do impacto visual.

Segundo o BLM (1986b) [2], para a definição da sensibilidade visual dos observadores é desejável que sejam avaliados o número de observadores, a frequência e duração dos períodos de visualização, as atitudes e preferências individuais destas pessoas, as atividades nas quais estão engajadas enquanto visualizam a área e as expectativas a respeito da qualidade cênica dos locais por eles vistos.

De forma a tornar mais prático o processo de aquisição de tais informações, estudo realizado pela Integral (2010) [9] para a avaliação das alterações paisagísticas de uma mineração de carvão, na África do Sul, promoveu a análise da sensibilidade visual levando em consideração os diferentes usos do solo. Isso se justifica pois os

diferentes usos estão relacionados a diferentes observadores, que por conseguinte, têm sensibilidades distintas. Como exemplo, foi definido que se um observador é residente em uma área a menos de 2,5km do projeto, sua sensibilidade a eventuais alterações paisagísticas é alta. Já se ele apenas transita por uma estrada local situada à mesma distância do projeto, em zona rural, sua sensibilidade é moderada a baixa.

Já a avaliação do efeito visual associado a um projeto, conforme BLM (1986a) [1], deve ser providenciada a partir da análise do grau de contraste combinada à relevância do projeto no campo visual do observador. A avaliação do grau de contraste obtida a partir da comparação entre a paisagem natural e as características do projeto, deve ser segmentada nos seguintes elementos: relevo/ corpos d'água, vegetação e estruturas. Para cada um deles avalia-se o grau de contraste em nenhum, fraco, moderado e forte, em termos de forma, linha, cor e textura. O grau de contraste do projeto com a paisagem natural é equivalente ao maior grau atribuído a qualquer um dos quesitos avaliados.

Por sua vez, a avaliação da relevância do projeto no campo visual de um observador pode ser determinada a partir de estudos de visibilidade desenvolvidos em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), segundo apresentado no item 3.3.

A partir de então, passa-se à definição da magnitude do impacto visual, a qual baseia-se em uma matriz que correlaciona os dois parâmetros anteriormente apresentados: sensibilidade dos observadores e efeito visual. Na Tabela 1, que segue, apesenta-se matriz desenvolvida pela Pimenta de Ávila (2026) [10] a partir de referências internacionais e baseando-se nas experiências consolidadas por meio do desenvolvimento de trabalhos com foco na avaliação de impactos visuais de estruturas geotécnicas.

Tabela 1 - Matriz para a determinação da significância do impacto visual. Fonte: Modificado por Pimenta de Ávila (2026) [10].

		Sensibilidade Visual		
		Alta	Moderada	Baixa/ Muito baixa
Efeito Visual	Alto	Significância Alta	Significância Alta	Significância Moderada
	Moderado	Significância Alta	Significância Moderada	Significância Moderada
	Baixo	Significância Moderada	Significância Moderada	Significância Baixa
	Muito Baixo	Significância Baixa	Significância Baixa	Significância Muito Baixa

3.3 Estudos de Visibilidade Aplicados à Análise de Impactos Visuais

A avaliação do efeito visual de um projeto demanda a análise de seu potencial de visibilidade, que pode ser obtido por meio de ferramentas de geoprocessamento, a partir das providências a seguir apresentadas.

Delimitação da zona de visibilidade

A delimitação da Zona de Visibilidade Teórica (ZVT) constitui uma etapa inicial e fundamental na avaliação de impactos visuais, sendo utilizada para identificar as áreas a partir das quais um empreendimento pode ser visível. A definição da ZVT deve considerar a escala do empreendimento, a configuração do relevo, a cobertura do solo, a presença de obstáculos naturais ou antrópicos e a localização dos principais receptores/observadores.

Em regiões de relevo predominantemente plano ou suavemente ondulado, a visibilidade tende a se estender por distâncias maiores, uma vez que a ausência de barreiras topográficas favorece a propagação das linhas de visada. Nessas condições, estruturas de grande porte podem ser percebidas a dezenas de quilômetros de distância, sobretudo quando se destacam em relação à paisagem circundante. Em contraste, em áreas montanhosas ou com relevo acidentado, a presença de elevações e vales fragmenta as linhas de visada, reduzindo significativamente a extensão contínua da visibilidade e gerando áreas intercaladas de visibilidade.

Segregação das faixas de visibilidade

Considera-se que dentro da ZVT, a paisagem pode ser segmentada em faixas com características de percepção distintas, associadas à distância entre o observador e o empreendimento. De forma geral, a percepção visual é mais intensa nas proximidades do empreendimento/estrutura, sendo gradualmente reduzida à medida que o observador se afasta. Essa variação está relacionada à capacidade humana de distinguir detalhes, perceber contrastes de cor e textura, além de reconhecer a forma e a escala das estruturas introduzidas na paisagem.

É comum segmentar a ZVT em quatro faixas principais de percepção visual, quais sejam: primeiro plano, onde o contraste de cor e os detalhes texturais do projeto são claramente perceptíveis; plano médio, no qual as ligações entre diferentes componentes da paisagem ainda estão claras, embora a percepção de detalhes finos fique menor; plano de fundo, caracterizado pela redução progressiva do contraste visual, porém mantendo-se ainda a capacidade de reconhecer a forma geral do empreendimento; e plano remoto, onde a percepção visual torna-se limitada, dependendo fortemente de fatores como iluminação, condições atmosféricas e contraste entre a estrutura e a paisagem.

Identificação da área de interesse do campo de visão humano

Um dos principais dados de entrada na avaliação do efeito visual de determinado projeto é a porcentagem do campo de visão de um observador por ele ocupada.

A avaliação do campo de visão humana requer a consideração das amplitudes horizontal e vertical. Na vertical os seres humanos são capazes de enxergar uma área correspondente a um ângulo de 135°, sendo 60° para cima da linha de visão e 75° para baixo. Ao se considerar a direção horizontal a área vista pode ultrapassar aquela contida num ângulo de 300°, quando se leva em conta a movimentação da cabeça.

Neste contexto, é fundamental estabelecer a região a ser considerada nas análises, de forma a garantir a representatividade da percepção visual do observador e a consistência dos resultados obtidos.

Verificação preliminar da visibilidade

De forma prévia à verificação preliminar, é necessário que seja preparado o Modelo Digital de Superfície (MDS) a ser empregado nas análises. Para casos em que o objetivo é identificar a máxima visibilidade possível, pode se justificar o emprego de Modelos Digitais de Terreno (MDT). Já se o objetivo é avaliar o potencial de visibilidade considerando os obstáculos naturais ou antrópicos nas linhas de visadas, potencialmente, a utilização de Modelo Digital de Elevação (MDE) gerará resultados mais representativos.

A análise de visibilidade em ambiente SIG, propriamente dita, conforme metodologia adotada pela Pimenta de Ávila (2026) [10], é realizada por meio do *ArcGIS*, empregando-se as diversas ferramentas disponíveis.

O resultado gerado a partir da análise é um *raster* no qual as células que podem ser visualizadas por um observador no ponto de observação recebem o valor 1, enquanto aquelas sem visibilidade recebem o valor 0 (Figura 2).

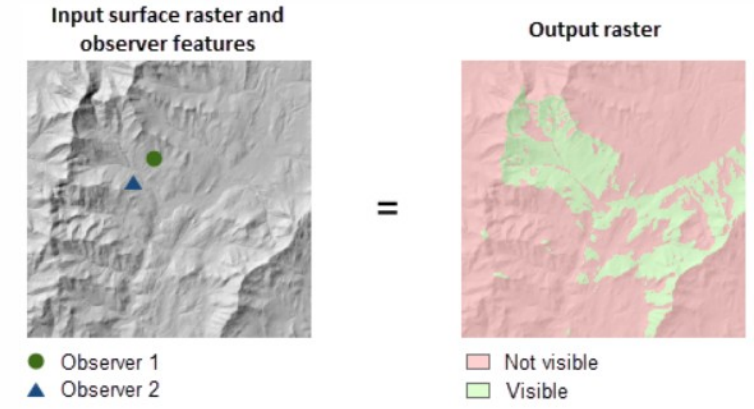


Figura 2 – Dados de entrada e saída da modelagem. Fonte: ESRI, (2026) [11].

Nesta primeira etapa do estudo, avalia-se a visibilidade a partir da estrutura para o entorno, considerando a elevação de interesse (inicial, intermediárias e/ou máxima). Ao final, os resultados de visibilidade obtidos para cada um dos pontos são sobrepostos de forma a se obter um mapeamento abrangente dos locais a partir dos quais há maior potencial de visualizar a estrutura na área de estudo.

Seleção dos pontos de interesse

Uma vez verificada a visibilidade da estrutura a partir do entorno, passa-se à seleção de pontos de interesse. Para tanto, combina-se os resultados da verificação preliminar de visibilidade com informações de uso e ocupação do solo, de forma que sejam selecionados pontos de interesse nos quais, de fato, exista potencial de visibilidade (desconsiderando, por exemplo, áreas de mata densa).

Uma visita aos pontos de interesse pode ser de grande valia para refinamento da seleção e calibração das modelagens.

Modelagem detalhada de visibilidade

Por meio da modelagem detalhada de visibilidade, avalia-se como a estrutura é percebida nos pontos onde sua visibilidade foi previamente confirmada, superando a simples identificação de visível ou não visível, obtida na verificação preliminar. Neste momento, portanto, a análise de visibilidade é feita a partir de cada um dos pontos de interesse selecionados, em direção à estrutura.

É importante ajustar os parâmetros de controle da análise de modo a representar o campo de visão humano pertinente à análise. Ainda, informações como a estatura dos observadores devem ser incorporadas. Cada ponto de observação deve ser configurado individualmente, de acordo com sua posição relativa à estrutura, considerando-se o plano cartesiano de referência.

Como resposta das simulações, é possível identificar as regiões potencialmente vistas a partir de cada ponto de observação, obter o perfil de visibilidade em uma linha de visada, bem como estimar a área que a estrutura ocupa no campo de visão de cada observador.

Na Figura 3, que segue, apresenta-se um exemplo de resultados gerados a partir do estudo de visibilidade. A posição dos observadores corresponde aos locais representados por círculos pretos e as linhas tracejadas são as linhas de visada. Para cada um dos perfis, as porções apresentadas em verde são aquelas passíveis de visualização, enquanto as regiões em vermelho, não o são. No caso do ponto 01, situado no primeiro plano da ZVT do projeto, é possível visualizá-lo desde suas primeiras elevações. Ainda conforme resultados das simulações, a estrutura ocupa um percentual de 6,58% do campo de visão do observador. Já para o ponto 02, localizado no plano médio da zona de visibilidade, o projeto ocupa um percentual de 1,75% do campo de visão do observador, sendo que apenas será possível sua visualização, quando ultrapassar a elevação de 70 metros.

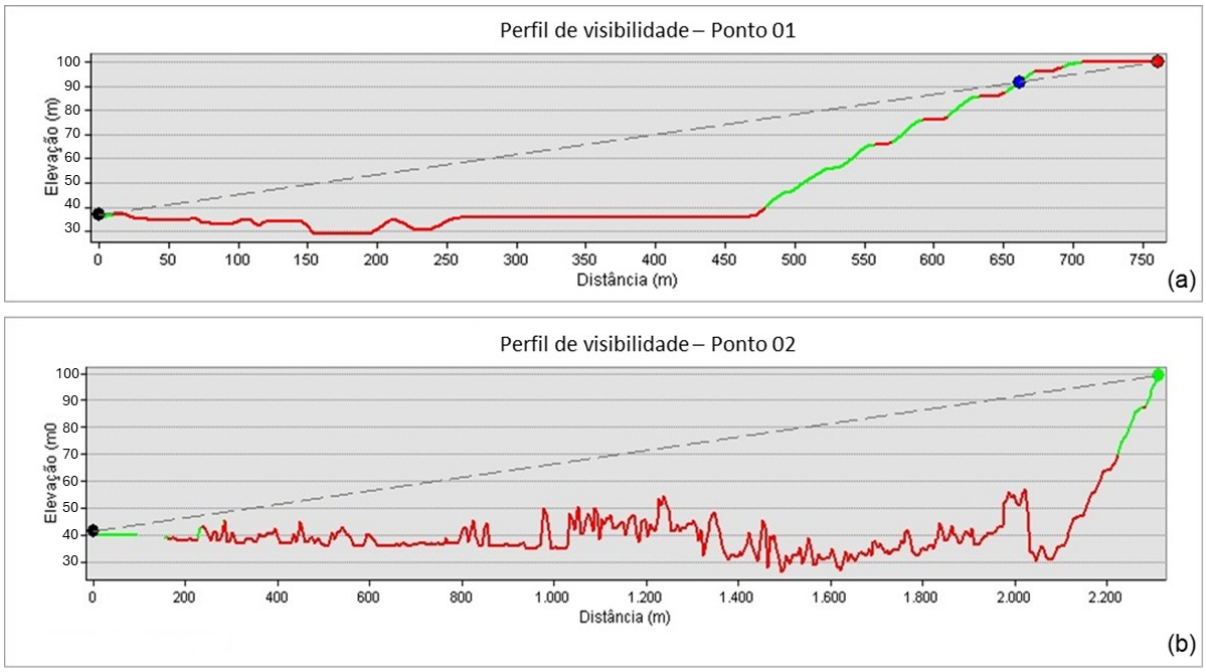


Figura 3 – Perfis de visibilidade obtidos a partir do ArcGIS, para dois pontos considerados em uma análise de visibilidade: (a) ponto 01, situado no primeiro plano da zona de visibilidade do projeto; e (b) ponto 02, localizado no plano médio da zona de visibilidade.

Combinando o percentual ocupado pela estrutura na área total do campo de visão de um observador com as respostas de contraste visual da estrutura com o ambiente do entorno, chega-se, portanto, ao efeito visual.

4. DIRETRIZES PARA PLANEJAMENTO E GESTÃO DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS SOB A PERSPECTIVA DA PAISAGEM

Uma vez identificados e avaliada a significância dos impactos visuais, é necessário seguir para a definição de medidas de mitigação. Segundo o *Landscape Institute & IEMA* (2013) [4], a mitigação de impactos visuais decorrentes de um projeto poderá abranger três tipos de técnicas distintas: medidas primárias, boas práticas em construção e operação, além de medidas secundárias.

As técnicas de **mitigação primárias e as boas práticas** em construção e operação são medidas que visam alterar o projeto, propriamente dito, de forma a melhorar a integração do mesmo com o meio. Entre as ações que podem se enquadrar neste tipo de medida tem-se a suavização da conformação topográfica do projeto, através da atenuação da inclinação de taludes, eliminação de quinas vivas, ou providências que o valham; reconceituação do projeto, com adequação das técnicas empregadas na operação do mesmo; e ainda a realização do fechamento progressivo.

Por se tratar de medidas aplicadas diretamente sobre o projeto, estas têm o potencial de serem mais efetivas, uma vez que um maior número de observadores poderá ser beneficiado por sua adoção. A providência da mitigação do impacto visual através de medidas embutidas no projeto, considerando os pontos onde as alterações identificadas possuem maior significância, promoverá, consequentemente, a redução

da modificação no ambiente de entorno identificado por observadores localizados em pontos com menor visibilidade.

Em países desenvolvidos a avaliação da integração visual de um projeto com a paisagem local antes de sua implantação já é uma realidade. Conforme *Landscape Institute & IEMA* (2013) [4], este é o momento adequado para se pensar em técnicas de mitigação dos impactos visuais adversos. Ademais, numa situação ideal todos os impactos visuais são atenuados por meio da implantação de medidas primárias de mitigação e da adoção de boas práticas em construção e operação.

No entanto, dada a possibilidade de existência de impactos visuais significativos persistentes mesmo após a adoção de medidas de mitigação primária, são previstas **medidas secundárias**. Tais medidas não são aplicadas diretamente sobre o projeto, mas em áreas adjacentes a ele ou em áreas adjacentes aos locais possivelmente afetados.

Dentre as medidas secundárias de atenuação dos impactos visuais adversos, tem-se: a revegetação de áreas desflorestadas; a reorientação da visualização; a integração através da utilização de árvores como balanços verticais; o emprego de cortinas arbóreas; e, não menos importante, a promoção de diálogos com a população do entorno, incorporando-a nos programas sociais desenvolvidos pela organização. Ressalta-se que a última medida, diferentemente das demais, tem por objetivo reduzir a sensibilidade visual dos observadores e não o efeito visual do projeto.

É válido destacar que as formas de mitigar podem envolver minimizar a modificação, retificá-la, reduzi-la gradualmente através de medidas simples ou, em último caso, compensá-la. A escolha da(s) forma(s) de mitigação depende das particularidades de cada situação.

Na Figura 4, que segue, apresenta-se um exemplo ilustrativo do impacto visual gerado por uma pilha considerando, em um primeiro momento, seus taludes expostos e, num segundo, a adoção de técnicas de revegetação dos taludes e topo da estrutura. Por sua vez, a Figura 5 ilustra a adoção de um tipo de medida secundária de mitigação, bem como um cenário onde pode-se observar o efeito cumulativo de medidas primárias e secundárias de mitigação do impacto visual.



Figura 4 - Ilustração comparativa do potencial impacto visual associado a uma pilha de estéril e/ou rejeito de mineração considerando: (a) todas as superfícies da estrutura expostas; e (b) a execução do fechamento, com revegetação dos taludes e do topo da pilha, medida primária de mitigação do impacto visual. Fonte: Elaborada pelos autores com auxílio de inteligência artificial generativa (OpenAI, ChatGPT/DALL·E), 2026.



Figura 5 - Ilustração comparativa do potencial impacto visual gerado por uma pilha de estéril e/ou rejeito de mineração considerando: (a) todas as superfícies da estrutura expostas e a adoção de cortina arbórea, medida secundária de mitigação do impacto visual; e (b) a execução do fechamento (medida primária) combinada à implantação de cortina arbórea (medida secundária). Fonte: Elaborada pelos autores com auxílio de inteligência artificial generativa (OpenAI, ChatGPT/DALL·E), 2026.

A partir do conhecimento técnico, é necessário, portanto, ponderar acerca das ações a serem adotadas para a mitigação do potencial impacto visual do projeto.

5. IMPACTOS VISUAIS, SUSTENTABILIDADE E LICENÇA SOCIAL PARA OPERAR

Nas últimas décadas, os projetos geotécnicos passaram a ser submetidos a um nível sem precedentes de pressão regulatória, financeira, social e reputacional para incorporação de práticas ESG (*Environmental, Social, and Governance*). Estruturas tradicionalmente avaliadas sob uma perspectiva predominantemente técnica, centrada em parâmetros de estabilidade e desempenho estrutural, passaram a ser compreendidas também como potenciais vetores de impactos ambientais, sociais, econômicos e institucionais, sobretudo após os grandes e amplamente conhecidos eventos envolvendo barragens de mineração.

Nesse contexto, aspectos como transparência, gestão integrada de riscos, participação de partes interessadas, adaptação às mudanças climáticas, planejamento de fechamento, preparação para emergências e manutenção da Licença Social para Operar (LSO), tornaram-se elementos centrais ao longo de todo o ciclo de vida dos empreendimentos.

Paralelamente, organismos internacionais e agentes financeiros passaram a exercer papel decisivo na consolidação de padrões ESG aplicáveis ao setor mineral e às estruturas geotécnicas associadas. Destacam-se: *o International Council on Mining and Metals* (ICMM), por meio de seus princípios de mineração responsável; a *United Nations* (ONU), especialmente através dos Princípios para o Investimento Responsável (PRI) e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS); e o *Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM*), que representou um marco internacional na gestão de barragens de rejeitos, ao estabelecer diretrizes voltadas não apenas à segurança física das estruturas, mas também à proteção das comunidades, à transparência, à governança, à gestão de riscos e à responsabilização corporativa.

Todo este cenário tem ampliado significativamente a relevância da gestão de impactos visuais associados a estruturas geotécnicas. Conforme anteriormente discutido, a percepção negativa da paisagem pode intensificar conflitos sociais, evidenciar práticas minerárias ambientalmente inadequadas, reduzir a confiança das partes interessadas, comprometer a imagem institucional das empresas, dificultar processos de licenciamento ambiental e ampliar a resistência social à implantação ou expansão dos empreendimentos, afetando diretamente a LSO.

Nesse contexto, a identificação, avaliação e mitigação de impactos visuais tornam-se instrumentos estratégicos para a gestão de riscos socioambientais e reputacionais. A adoção de práticas que promovam a integração das estruturas geotécnicas com a paisagem contribui, portanto, não apenas para a redução dos impactos visuais, mas também para o fortalecimento da reputação institucional, da governança corporativa e da sustentabilidade dos empreendimentos no longo prazo.

6. CONCLUSÕES

A avaliação de impactos visuais em projetos geotécnicos representa um componente importante para o planejamento sustentável de empreendimentos minerários, aceitação social dos projetos e qualidade de vida das populações. Contudo, embora a avaliação de impactos ambientais seja prática consolidada no Brasil, a análise sistemática de impactos visuais ainda é pouco difundida, diferentemente do observado em países desenvolvidos.

A integração entre métodos quantitativos, como análises de visibilidade em ambiente SIG, e abordagens qualitativas, relacionadas à percepção da paisagem, permite uma compreensão mais abrangente dos efeitos das intervenções no território, contribuindo para a tomada de decisão informada e para a mitigação de impactos. Além disso, a consideração dos aspectos visuais desde as fases iniciais do projeto fortalece a governança e favorece a obtenção e manutenção da Licença Social para Operar.

Dessa forma, a integração entre critérios técnicos, ambientais e sociais corresponde atividade essencial para o desenvolvimento de soluções mais equilibradas e sustentáveis no setor mineral.

7. PALAVRAS-CHAVE

Impacto visual; Paisagem; Estruturas Geotécnicas; Planejamento minerário; Geoprocessamento.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BUREAU OF LAND MANAGEMENT (BLM) of U.S. Department of the Interior. *Manual 8431 - Visual Resource Contrast Rating*. 1986a.

[2] BUREAU OF LAND MANAGEMENT (BLM) of U.S. Department of the Interior. *Manual H-8410-1 - Visual Resource Inventory*. 1986b.

[3] BUREAU OF LAND MANAGEMENT (BLM) of U.S. Department of the Interior. *Visual Resources Spatial Data Standard*. 2018.

[4] LANDSCAPE INSTITUTE and INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT & ASSESSMENT. *Guidelines for Landscape and Visual Impact Assessment*. 3ª edição. 2013.

[5] BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2 set. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 16 de maio 2026.

[6] BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação

de impacto ambiental. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 17 fev. 1986. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=745. Acesso em: 16 de maio 2026.

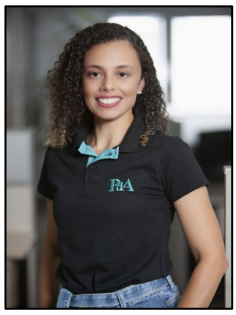
[7] SMARDON, Richard C.; PALMER, James F.; KNOPF, Alfred; GRINDE, Kate; HENDERSON, Jim E.; PRYMAN-DOVE, Linda D. *Visual Resources Assessment Procedure for U.S. Army Corps of Engineers*. Vicksburg: Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, 1988. (Instruction Report EL-88-1).

[8] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). *Guidelines for the Visual Impact Assessment of Highway Projects*. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2015. Disponível em: https://www.environment.fhwa.dot.gov/env_topics/other_topics/VIA_Guidelines_for_Highway_Projects.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 01 de maio 2026.

[9] INTEGRAL - Landscape Architecture & Visual Planning. Continuation of Boggabri Coal Mine Visual Impact Assessment. 2010.

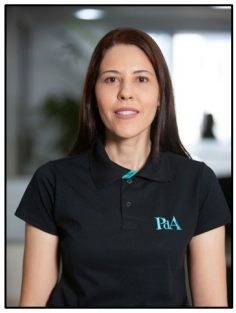
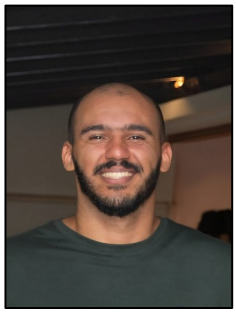
[10] PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA. *Instrução de trabalho para avaliação do impacto visual de estruturas geotécnicas*. Belo Horizonte, 2026. 28 p. Documento interno. Referência: IT-EA-003. Revisão 00.

[11] ESRI. *Using Observer Points*. Redlands, CA. Disponível em: https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/visibility.htm. Acesso em: 05 de maio 2026.



Maíra REIS

Engenheira ambiental geotécnica, com mais de 8 anos de experiência em consultoria voltada a estruturas geotécnicas dos setores de mineração, energia e indústria. Atua em projetos multidisciplinares, como em estudos de alternativas, avaliação de interferências, avaliação e mitigação de impactos, modelagens com foco ambiental e planos de fechamento. Possui ampla experiência em gestão de segurança, riscos e emergências associadas a estruturas geotécnicas.

	**Giani ARAGÃO** Engenheira ambiental geotécnica, 21 anos de experiência em consultoria. Atuação em gestão de segurança, risco e emergência de barragens, fechamento de mina, estruturas geotécnicas e empreendimentos industriais. Liderança de equipes e projetos multidisciplinares, incluindo soluções de engenharia conceitual a executivo, metodologia de uso futuro, revegetação, monitoramento e estimativa de custos.
	**Luan COSTA** Graduado em Engenharia Ambiental pela Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto em 2023, atualmente é pós-graduando em Recursos Hídricos e Ambientais pela Universidade Federal de Minas Gerais. Atua em projetos multidisciplinares voltados ao geoprocessamento, gestão de risco e emergência de barragens, monitoramento ambiental e análise de dados espaciais.
	**Carine LIMA** Graduada em Engenharia Ambiental pela Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) em 2024, Carine passou a integrar o time da Pimenta de Ávila Consultoria em 2025, atuando em projetos multidisciplinares associados a estruturas geotécnicas, com foco em estudos de uso futuro/planos de fechamento e gestão de emergência.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

MORCEGOS DE PEDRAIS EM ESTRUTURAS ARTIFICIAIS CRIADAS PELA UHE BELO MONTE

Roberto LEANDRO DA SILVA

Biólogo I Gerente de Meios Físico e Biótico – Norte Energia S.A

Ralder FERREIRA ROSSI

Biólogo I Coordenador Técnico – EcoBrasil Consultoria Ambiental

Bruno GONÇALVES BAHIANA

Engenheiro Agrícola e Ambiental I Superintendente Socioambiental e do Componente Indígena – Norte Energia S.A

Patrício ROCHA

Biólogo I Consultor Especialista – EcoBrasil Consultoria Ambiental/UFPB

Fernanda CAPUZO SANTIAGO

Bióloga I Especialista Socioambiental – Norte Energia S.A

Valéria Fernanda SARACURA

Consultora Autônoma – QCA Ltda

RESUMO

Os morcegos fornecem serviços ecossistêmicos relevantes, incluindo o controle de pragas, a polinização e a dispersão de sementes. O Projeto de Monitoramento de Quirópteros (PMQ) da UHE Belo Monte acompanha a fauna associada aos pedrais ripários do rio Xingu, identificando dez espécies típicas desse ambiente ao longo de 28 campanhas (2012–2025). Com a implantação do empreendimento, foram criadas estruturas artificiais, como 28 diques, uma ponte sobre o canal de derivação, a comporta do canal de adução e o próprio canal de derivação, que compõem o Reservatório Intermediário e passaram, a partir de 2019 (C16), a ser investigadas como potenciais abrigos alternativos. Ao todo, foram registradas 13 espécies nessas estruturas artificiais, das quais, sete são típicas de ambientes de pedrais, incluindo *Furipterus horrens* (Vulnerável – MMA) **[1]**. Registros de jovens, fêmeas lactantes e pós-lactantes indicam que estruturas como os diques do Reservatório Intermediário, a Comporta e a Ponte do Canal de Derivação atuam como berçários para *Peropteryx* spp., *Neoplatymops mattogrossensis*, *Noctilio*

albiventris e *Myotis* spp. Os resultados demonstram que estruturas artificiais associadas a empreendimentos hidrelétricos podem constituir abrigos funcionais para espécies hábitat-dependentes de pedrais, sendo relevantes para subsidiar estratégias de conservação e mitigação em projetos que afetem esses ambientes.

ABSTRACT

Bats provide key ecosystem services, including pest control, pollination, and seed dispersal. The Chiroptera Monitoring Programme (PMQ) of UHE Belo Monte has monitored the bat fauna associated with rocky outcrops (pedrais) along the Xingu River over 28 campaigns (2012–2025), identifying ten species typical of this habitat. The construction of UHE Belo Monte involved the creation of artificial structures, suck as 28 dikes, a bridge over the diversion channel, the intake-canal gate and the diversion canal itself, which have been investigated as potential alternative roosts since 2019 (Campaign 16). In total, 13 species were recorded in artificial structures, seven of which are typical rocky-outcrop species, including *Furipterus horrens* (Vulnerable – MMA). Records of juveniles, lactating and post-lactating females confirm that structures such as the Intermediate Reservoir dikes, the Intake Gate and the Diversion Canal Bridge serve as nurseries for *Peropteryx* spp., *Neoplatymops mattogrossensis*, *Noctilio albiventris* and *Myotis* spp. These results demonstrate that artificial structures associated with hydroelectric projects can function as suitable roosts for habitat-dependent rocky-outcrop bat species, providing valuable data to support conservation and mitigation strategies in projects affecting such environments.

1. INTRODUÇÃO

Os morcegos (Ordem Chiroptera) constituem o segundo maior grupo de mamíferos em diversidade, com papel fundamental nos ecossistemas tropicais por meio do controle natural de insetos, polinização de flores e dispersão de sementes **[2]**. No contexto da Amazônia, a fauna de quirópteros associada aos pedrais ripários, ambientes formados por afloramentos rochosos nos leitos e margens de rios, representa um grupo hábitat-dependente das fendas rochosas como abrigos e sítios reprodutivos.

A maior parte do conhecimento ecológico sobre as espécies de morcegos de pedrais da Amazônia foi produzida a partir dos estudos realizados para a implantação de hidrelétricas no bioma, com destaque para a UHE Belo Monte, no rio Xingu, no Pará. O Projeto de Monitoramento de Quirópteros (PMQ) da UHE Belo Monte acompanha sistematicamente a quiropterofauna desde a etapa de Implantação do empreendimento (2012), acumulando 28 campanhas amostrais até 2025. Ao longo dessas campanhas, foram identificadas dez espécies típicas de pedrais na Volta Grande do Xingu (Figura 1), pertencentes a seis famílias **[3]**.

Com a implantação da usina, a formação do Reservatório do Xingu (RX) e do Reservatório Intermediário (RI) envolveu a construção de 28 diques, além de uma ponte sobre o canal de derivação, a comporta do canal de adução e do próprio canal de derivação. Essas estruturas artificiais, por apresentarem características físicas similares aos pedrais naturais (fendas, vãos de concreto e blocos de rocha), passaram a ser investigadas a partir de 2019 como potenciais abrigos alternativos para as espécies típicas de pedrais.

Este trabalho apresenta os resultados acumulados das amostragens em abrigos artificiais das campanhas realizadas entre os anos 2019 a 2025, discutindo a capacidade dessas estruturas em desempenhar parcialmente a função ecológica dos pedrais naturais como abrigos e berçários para as espécies monitoradas.

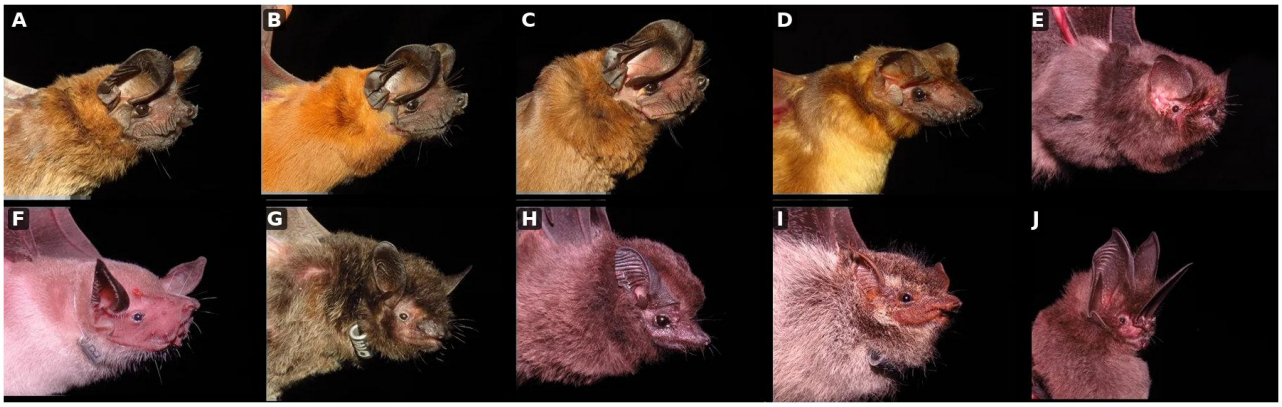


Figura 1 – Espécies de morcegos típicas dos pedrais do rio Xingu registradas pelo Projeto de Monitoramento de Quirópteros da UHE Belo Monte, Pará. **(A)** *Nyctinomops* sp.; **(B)** *Nyctinomops aurispinosus*; **(C)** *Nyctinomops macrotis*; **(D)** *Neoplatymops mattogrossensis*; **(E)** *Furipterus horrens*; **(F)** *Noctilio albiventris*; **(G)** *Myotis* spp.; **(H)** *Peropteryx* spp.; **(I)** *Rhynchonycteris naso*; **(J)** *Lonchorhina aurita*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo e infraestrutura monitorada

A área de estudo compreende o trecho médio do rio Xingu, na Volta Grande do Xingu, no Estado do Pará. A UHE Belo Monte compreende dois reservatórios: o Reservatório do Xingu (RX), formado pelo barramento principal na calha do rio Xingu, e o Reservatório Intermediário (RI), criado a partir de diques que interligam os pontos mais elevados da topografia entre os dois canais artificiais, e que inundou antigas áreas de pastagens.

As estruturas artificiais amostradas foram: (A) Comporta do Canal de Derivação; (B) Diques do Reservatório Intermediário; e (C) Ponte do Canal de Derivação (Figura 2). Os diques, em especial, apresentam grandes blocos de rocha utilizados como enrocamento, formando fendas e cavidades semelhantes às encontradas nos pedrais naturais.



Figura 2 – Principais estruturas artificiais associadas à UHE Belo Monte investigadas como abrigos alternativos para morcegos típicos de pedrais. **(A)** Comporta do Canal de Derivação. **(B)** Diques do Reservatório Intermediário. **(C)** Ponte do Canal de Derivação. **(D)** Morcegos abrigados em fenda de dilatação da Comporta do Canal de Derivação. UHE Belo Monte, Pará, Brasil.

2.2 Métodos de amostragem

As campanhas ocorreram em duas estações distintas: seca (entre agosto e dezembro) e cheia (entre março e maio), permitindo avaliar a variação sazonal no uso dos abrigos artificiais. As amostragens foram realizadas por meio de redes de neblina posicionadas nas saídas dos abrigos artificiais durante as campanhas semestrais C16 (seca/2019) a C28 (seca/2025).

Para a captura dos morcegos, em cada pedral foram instaladas redes de neblina envolvendo as fendas utilizadas como abrigo. As capturas foram realizadas no período crepuscular, entre 18h e 21h, quando os morcegos deixam os abrigos para forragear. O esforço amostral correspondeu a três horas de captura por noite, durante três noites em cada pedral, totalizando 27 noites amostrais e 81 horas de amostragem por campanha.

Para cada indivíduo capturado foram registrados, entre outros, a localidade, a data e o horário da captura. Os morcegos foram acondicionados em sacos de pano e, ainda no local de captura, foram obtidos os dados biológicos individuais, incluindo biometria, massa corporal e sexo. Os indivíduos aptos à marcação receberam colares com numeração individual sequencial. Após a conclusão dos procedimentos de triagem, todos os animais foram soltos no mesmo local onde foram capturados.

Os morcegos capturados foram identificados em nível de espécie, sexados e avaliados quanto ao estado reprodutivo (prenhes, lactantes ou pós-lactantes) e à classe etária (jovens ou adultos). Indivíduos de gêneros com identificação duvidosa em campo foram agrupados em *Myotis* spp. e *Peropteryx* spp., conforme padronização adotada a partir de 2018 **[3]**.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Espécies registradas nos abrigos artificiais

Ao longo das campanhas C16 a C28, foram capturados **546 indivíduos de 12 espécies** nos abrigos artificiais. Dessas, cinco são atípicas quanto ao uso de pedrais (*Carollia perspicillata, Glossophaga soricina, Macrophyllum macrophyllum, Molossus molossus* e *Molossus* sp.) e sete são típicas, representando **70% das espécies-foco do monitoramento**. O Quadro 1 apresenta as espécies típicas registradas nas estruturas utilizadas.

Quadro 1 – Abundância total de morcegos por espécie e por estrutura artificial monitorada na UHE Belo Monte, Pará (campanhas C16–C28, 2019–2025). * *Furipterus horrens*: Vulnerável – Lista MMA (2022). – = ausência de registros. Comporta = Comporta do Canal de Derivação.

Uso do pedral	Espécie	Comporta	Diques RI	Ponte Canal Deriv.	Total
Atípicas	*Carollia perspicillata*	–	1	30	31
	Glossophaga soricina	–	1	–	1
	Macrophyllum macrophyllum	–	1	–	1
	Molossus molossus	24	–	2	26
	Molossus sp.	8	–	–	8

Típicas	*Furipterus horrens**	1	3	–	4
	Myotis spp.	28	1	44	73
	Noctilio albiventris	167	1	2	170
	Nyctinomops sp.	13	10	157	180
	Neoplatymops mattogrossensis	–	14	–	14
	Peropteryx spp.	–	16	–	16
	Rhynchonycteris naso	–	22	–	22
Total		**241**	**70**	**235**	**546**

3.2 Uso dos diques do Reservatório Intermediário

Os diques do RI abrigaram exclusivamente espécies típicas de pedrais que utilizam fendas rochosas naturais. *Peropteryx* spp. foram encontrados em aglomerados de grandes blocos de enrocamento, com fendas e espaços físicos análogos aos pedrais naturais. Nas campanhas de seca C16 e C18, a maioria das fêmeas capturadas estava pós-lactante, indicando uso reprodutivo dessas estruturas. *Neoplatymops mattogrossensis* foi registrado exclusivamente nos diques, em fendas estreitas características de seu hábitat natural; na C22 (seca/2022), pela primeira vez foram registrados três fêmeas pós-lactantes e cinco jovens, confirmando o uso dos diques como berçário para essa espécie.

3.3 Comporta e Ponte do Canal de Derivação

A Comporta do Canal de Derivação abrigou a maior colônia registrada nos abrigos artificiais, composta por centenas de *Noctilio albiventris*, com **167 indivíduos capturados** ao longo das campanhas. A presença de jovens, fêmeas lactantes e pós-lactantes demonstra que a comporta funciona como abrigo e berçário viável para essa espécie. Em outras palavras, pode-se afirmar que a Comporta do Canal de Derivação é uma incidental e bem-sucedida “Bat House” de grandes proporções. Ainda que não tenha sido construída com esse fim, sua arquitetura pode ser replicada em outros empreendimentos similares, como um bom exemplo de “Bat-friendly Construction”

A Ponte do Canal de Derivação destacou-se pelas colônias de *Nyctinomops* sp. e *Myotis* spp. que utilizam as fendas de dilatação do concreto. Para *Myotis* spp., espécie com baixa frequência nos pedrais, as fendas de concreto mostraram-se abrigos adequados, com registro de fêmeas prenhes em múltiplas campanhas, sugerindo que estruturas desse tipo podem compensar, ao menos parcialmente, a perda de abrigos naturais para esse gênero.

3.4 *Furipterus horrens*: espécie ameaçada de extinção

Furipterus horrens (Vulnerável **[1]**) foi registrada nos diques do RI e na Comporta do Canal de Derivação, embora em baixas abundâncias (n = 4). Ao longo das amostragens do PMQ, 96% dos indivíduos capturados dessa espécie foram registrados nos pedrais, dado que contrasta com sua biologia conhecida de uso

preferencial de cavernas **[4]**, onde encontra condições adequadas de abrigo. **[4]** também relatam que, embora menos frequente, a espécie pode utilizar construções humanas como refúgio, indicando certa plasticidade na seleção de abrigos.

Nesse contexto, o registro de *F. horrens* nos diques do RI e na Comporta do Canal de Derivação demonstra que essas estruturas artificiais podem ser utilizadas como abrigos ocasionais. Entretanto, a predominância de registros nos pedrais (96%) indica que essas estruturas artificiais não desempenham papel equivalente aos abrigos naturais, funcionando provavelmente como refúgios complementares ou oportunísticos. Esses resultados indicam que os pedrais do Xingu representam um hábitat singular para populações regionais dessa espécie, enquanto o monitoramento contínuo dos abrigos artificiais é importante para avaliar sua contribuição como habitats suplementares em paisagens modificadas.

Os pedrais do Xingu compõem um ecossistema único, pioneiramente estudado no PMQ, não havendo, portanto, dados na literatura que permitam comparações com outros estudos.

4. CONCLUSÕES

Os resultados acumulados no PMQ da UHE Belo Monte demonstram que as estruturas artificiais construídas para a implantação do empreendimento, especialmente os diques do Reservatório Intermediário e as estruturas do Canal de Derivação, constituem abrigos funcionais para algumas espécies típicas dos pedrais ripários do rio Xingu.

A diversidade de espécies registradas (sete das dez espécies-foco do monitoramento) e os indícios de atividade reprodutiva em múltiplas estruturas indicam que esses abrigos artificiais desempenham papel complementar aos pedrais naturais na manutenção das populações de morcegos na área de influência do empreendimento. Esse papel é particularmente relevante para espécies como *Peropteryx* spp., *Neoplatymops mattogrossensis*, *Noctilio albiventris* e *Myotis* spp., para as quais a atividade reprodutiva em estruturas artificiais foi confirmada.

Esses achados são relevantes para subsidiar o planejamento ambiental de futuros empreendimentos hidrelétricos em regiões com fauna associada a pedrais, indicando que a inclusão de estruturas com características físicas análogas, especialmente enrocamentos com blocos de rocha e fendas de diferentes dimensões, pode ser considerada como medida de mitigação complementar à conservação dos pedrais naturais remanescentes.

5. PALAVRAS-CHAVE

Quirópteros, morcegos de pedrais, UHE Belo Monte, rio Xingu, abrigos artificiais, Bat House.

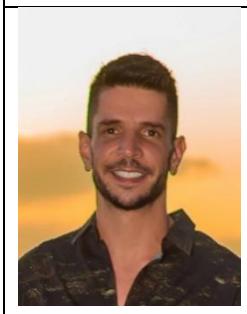
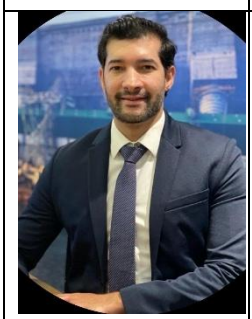
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

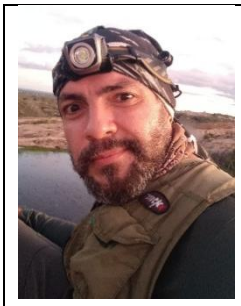
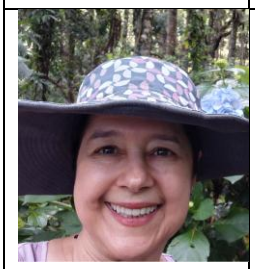
[1] MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2022) – "Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção". Portaria nº 148, de 7 de julho de 2022.

[2] KUNZ, T. H.; BRAUN DE TORREZ, E.; BAUER, D.; LOBOVA, T.; FLEMING, T. H. (2011) – "Ecosystem services provided by bats". Annals of the New York Academy of Sciences, v. 1223, p. 1–38.

[3] NORTE ENERGIA S.A. (2026) – "26º Relatório Consolidado de Andamento do PBA e do Atendimento de Condicionantes – Anexo 12.3.9: Projeto de Monitoramento de Quirópteros da UHE Belo Monte". Belém, Pará.

[4] UIEDA, W.; SAZIMA, I.; STORTI FILHO, A. (1980) – "Aspectos da biologia do morcego *Furipterus horrens* (Mammalia, Chiroptera, Furipteridae)". Revista Brasileira de Biologia, v. 40, n. 1, p. 59–66.

	**Roberto Leandro da SILVA** Biólogo e mestre em ecologia e produção sustentável. Mais de 20 anos de experiência na gestão e execução de monitoramentos e mitigações socioambientais em projetos estruturantes do setor elétrico. Atua na Norte Energia desde 2013, atualmente é Gerente de Meios Físico e Biótico, ligado a mais de 40 projetos, que atendem às condicionantes do licenciamento da UHE Belo Monte.
	**Ralder Ferreira ROSSI** Graduado em Ciências Biológicas (UEG) e MBA em Gestão de Projetos e Processos (IPOG). Atualmente, estou como Coordenador Técnico de projetos do Programa de Conservação da Fauna Terrestre e Aquática da UHE Belo Monte. Atua em processos de monitoramento socioambiental, com experiência em manejo de fauna silvestre em empreendimentos hidrelétricos.
	**Bruno Gonçalves BAHIANA** Engenheiro Agrícola e Ambiental pela UFF, com pós-graduação em MBA em Petróleo, Gás e Energia (UVA) e em Antropologia (Unyleya). Mestre em Biodiversidade e Conservação (UFPA). Possui formação complementar pelo MIT, Harvard e FGV, e atua há mais de 15 anos no gerenciamento, avaliação e monitoramento de projetos socioeconômicos e ambientais no setor de energia. Atualmente, é Superintendente Socioambiental e do Componente Indígena na Norte Energia.

	**Patrício Adriano da ROCHA** Graduado em Ciências Biológicas, Mestre em Ecologia e Conservação (UFS) e Doutor em Ciências Biológicas (Zoologia) (UFPB). Atualmente é membro Colaborador do Corpo Docente do Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas da UFPB (onde oriento Mestrado e Doutorado), associado ao Lab. de Mamíferos da UFPB. Atua principalmente nos temas: Diversidade, ecologia e conservação de mamíferos neotropicais, com ênfase em Ecologia e Bioacústica de Chiroptera.
	**Fernanda Capuzo SANTIAGO** Graduada em Biologia (bacharelado e licenciatura) pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO) e mestrado em Ecologia e Produção Sustentável pela mesma instituição. Atualmente atua como Especialista Socioambiental na empresa Norte Energia, onde realiza a gestão de projetos socioambientais relacionados à fauna (terrestre, aquática e semiaquática) atendendo as condicionantes do licenciamento ambiental da UHE Belo Monte.
	**Valéria Fernanda SARACURA** Graduada em Zootecnia, com mestrado em Ciência Animal e doutorado em Biologia Animal, possui mais de 30 anos de experiência nas áreas de licenciamento ambiental, gestão ambiental, manejo e conservação de animais silvestres e de áreas protegidas, pela Quatipuru Consultoria Ambiental Ltda.

BRAZILIAN COMMITTEE ON DAMS
I SYMPOSIUM ON LARGE GEOTECHNICAL STRUCTURES
THEME GE.3
BELÉM, PA, BRAZIL – SEPTEMBER 21–22, 2026

ENVIRONMENTAL MANAGEMENT PRACTICES IN THE DISPOSAL OF TAILINGS IN LARGE RESERVOIRS: APPLICATION OF PERFORMANCE INDICATORS IN THE SOSSEGO COPPER TAILINGS DAM

BARBOSA, Felipe
Geotechnical Manager – Vale Base Metals

BELOTTO, Gustavo
Geotechnical Engineer - Vale Base Metals

RODRIGUES, João Paulo
Geotechnical Manager - Vale Base Metals

OLIVEIRA, Dfferson
Civil Engineer - Vale Base Metals

FERREIRA, Juliano
Civil Engineer - Vale Base Metals

ABSTRACT

Environmental management of tailings disposal in large reservoirs is a key element for safety, governance, and the sustainable closure of tailings dams [1], [2]. Over recent decades, the continuous growth of mineral production has led to an expressive increase in tailings volumes, demanding more complex operational control and higher standards of environmental performance throughout the entire life cycle of tailings facilities. During the operational phase, hydraulic, geotechnical, and operational variability may compromise the predictability of reservoir occupation, the control of supernatant water, and the geometric conformity required for safe and environmentally responsible closure [3].

The adopted methodology integrates disposal planning, periodic topobathymetric monitoring, and performance indicators (Key Performance Indicators – KPIs), adapted from consolidated mine planning practices and applied as an operational management tool [4]. The approach is structured according to the PDCA cycle (Plan–Do–Check–Act), allowing the evaluation of adherence between the disposal plan and the executed reservoir geometry, and supporting continuous operational improvement [4].

Reservoir sectorization and spatial comparison between planned and measured surfaces enable the identification of deposition deviations, recalibration of operational parameters, and implementation of adjustments that minimize potential environmental impacts and risks associated with closure [5], [6].

1. INTRODUCTION

The continuous growth of mineral production has resulted in increasing volumes of tailings, imposing more complex technical and environmental challenges for tailings dam management [2]. Modern mining operations routinely generate millions of tonnes of tailings per year, often stored in large surface reservoirs that must remain stable and environmentally safe not only during operation but also after mine closure. In this context, tailings dams represent some of the largest existing engineering structures, and their long-term performance is strongly influenced by operational practices adopted during active disposal.

In large reservoirs, tailings disposal practices during the operational phase directly influence geotechnical safety, hydraulic performance, facility governance, and the feasibility of environmentally responsible closure [1]. Variations in tailings properties, discharge rates, and operational constraints may lead to deviations from planned deposition geometries, potentially affecting storage efficiency, water management, and closure conditions. Recent industry experience has reinforced the need for management practices that act preventively, reducing uncertainties and risks throughout the entire lifecycle of tailings facilities [7].

In this context, environmental management of tailings disposal is not limited to post-impact monitoring but involves systematic control of operational processes that determine reservoir geometric occupation, supernatant pond positioning, and final closure conditions [6]. By acting directly on the causes of potential environmental impacts, rather than only on their consequences, preventive management approaches contribute to improved safety margins and more predictable closure outcomes. Recent international guidelines, such as the Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM), emphasize integration between planning, operation, monitoring, and closure, highlighting the role of performance-based management systems and continuous improvement [1].

This paper aims to present the application of environmental management practices for tailings disposal at the Sossego Copper Mine Tailings Dam (Figure 1), focusing on the use of performance indicators derived from geometric reconciliation between planned and executed surfaces. The approach demonstrates how structured operational control can contribute to reducing potential environmental impacts, improving governance, and supporting progressive closure of tailings dams [2].

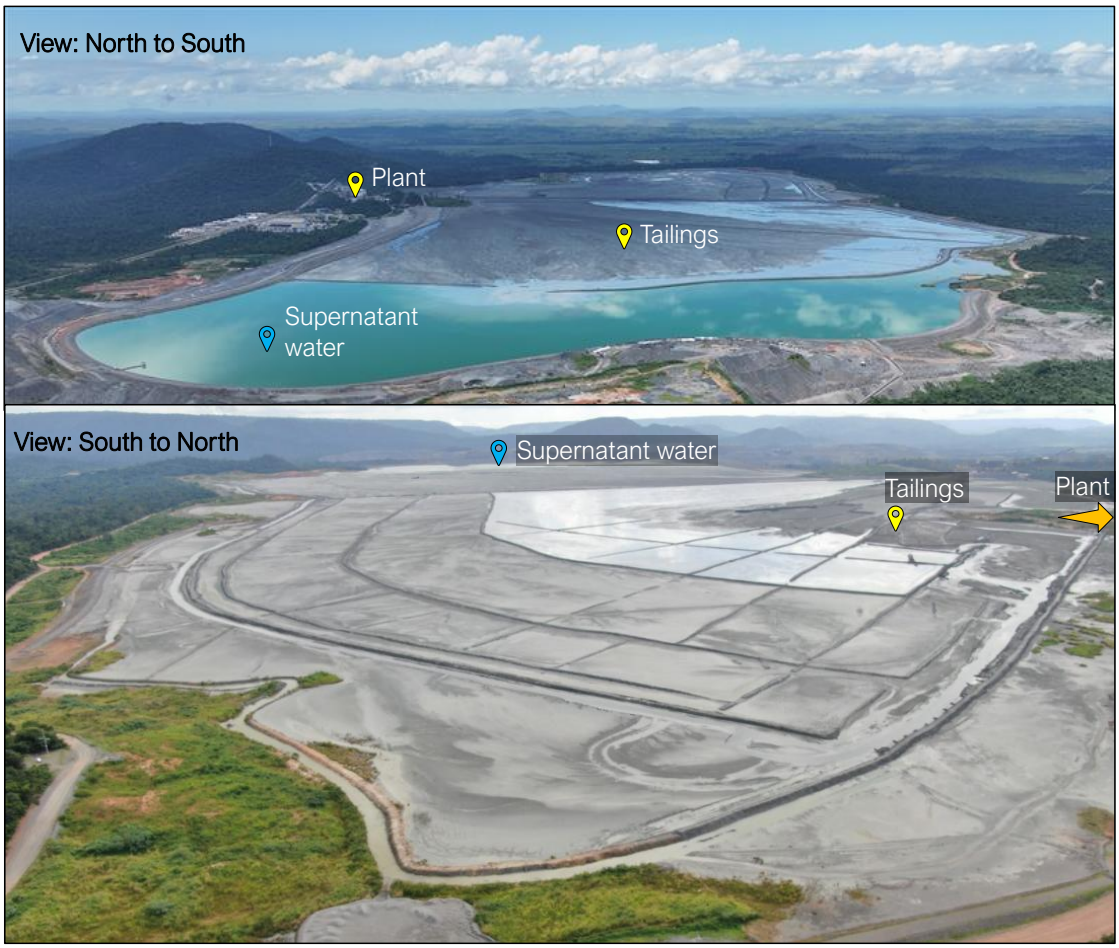


Figure 1 – Overview of Sossego Tailings Storage Facility and Water Management Structures.

2. THEORETICAL BACKGROUND

2.1 Tailings disposal planning and environmental management

Tailings disposal plans are fundamental instruments for guiding volumetric occupation of large reservoirs in a safe and predictable manner [5]. They define discharge strategies, preferential deposition areas, elevation targets, and operational constraints, serving as a reference for daily operation and long-term reservoir development. Traditionally, these plans are developed based on laboratory testing, rheological analyses, and conceptual beach formation models to estimate slopes, flow distances, and spatial distribution of tailings [3].

However, technical literature recognizes that real operational conditions frequently diverge from design assumptions due to mineralogical variability, changes in processing routes, seasonal effects, and operational adjustments over time [5]. From an environmental perspective, such uncertainties may compromise reservoir occupation predictability, increase the need for corrective interventions, and hinder compliance with closure requirements [6]. These deviations may also lead to inefficient use of storage capacity and increased disturbance during corrective earthworks. This premise underlies the approach adopted in the present case study, in which periodic topobathymetric monitoring and performance indicators are used to detect such

deviations early and support timely operational adjustments, as detailed in the Methodology and Results sections.

Therefore, tailings disposal planning should be regarded as a dynamic and adaptive process, continuously updated through operational data, monitoring results, and periodic reviews. International tailings management handbooks emphasize the importance of integrating planning with monitoring and decision-making processes, ensuring that disposal strategies evolve consistently with actual reservoir behavior and closure objectives [2].

2.2 Geometric formation of tailings beaches

Tailings beach formation results from the interaction between material rheological properties, hydraulic discharge conditions, and reservoir topography [3]. Analytical and semi-empirical models have been proposed to estimate beach slopes and deposition profiles and are widely used as planning support tools, particularly for thickened and non-segregating tailings systems.

Classic studies show that small variations in beach slope may lead to significant differences in storage capacity, footprint, and internal drainage conditions of tailings reservoirs, with direct implications for dam safety and closure performance [3]. A change of a few tenths of a percent in average beach slope may represent millions of cubic meters of additional or lost storage capacity over the life of a facility.

Despite their importance, such models present limitations when applied in isolation to operational management, as they do not fully capture the temporal evolution of deposition under real field conditions (Figure 2). For this reason, continuous validation of predicted geometries through topographic and bathymetric surveys is widely recommended in technical literature as a preventive environmental management practice, allowing early identification of deviations and timely operational adjustments [2].

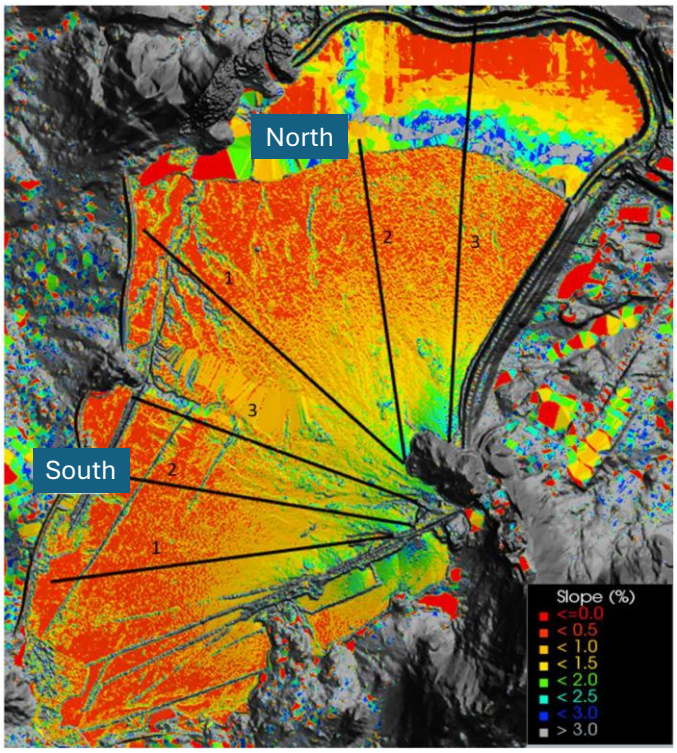


Figure 2 – Heat map of beach slope variation at Sossego Tailings Dam, 2023.

2.3 Observational approach and performance indicators

The observational approach, originally developed in geotechnical engineering, is based on the principle that actual structural behavior must be continuously monitored and compared with design assumptions, allowing gradual and evidence-based adjustments [1]. In tailings management, this approach has been incorporated into performance-based monitoring and management systems aligned with the GISTM, reinforcing the need for systematic data collection and feedback loops.

Performance indicators are essential tools in this process, enabling objective evaluation of adherence between planned and executed conditions. Concepts originally applied in mine planning, such as geometric adherence and conformity indicators, have been successfully adapted to assess execution of operational plans in tailings disposal, providing quantitative support for decision-making and continuous improvement [4]. When properly implemented, these indicators enhance transparency, accountability, and consistency in environmental management practices.

3. METHODOLOGY

3.1 Study area

The methodology was applied to the Sossego Copper Mine Tailings Dam, located in Pará State, Brazil (Figure 1). The facility is a large-scale reservoir operating with hydraulic tailings disposal, whose environmental and operational performance is directly associated with volumetric occupation over time, control of supernatant water, and alignment with closure strategies [2]. The reservoir occupies an area of

approximately 8.34 km², currently at full (100%) occupancy, with a stored tailings volume of approximately 157 Mm³ against a total storage capacity of approximately 163 Mm³, and an average tailings disposal rate of approximately 7.2 Mm³/year.

3.2 Disposal planning and monitoring

The adopted disposal plan defines preferential discharge sectors, control elevations, and volumetric occupation targets, considering operational requirements, dam safety criteria, and closure guidelines [5]. Execution verification is carried out through topographic and bathymetric surveys performed on a quarterly basis (every three months), integrated into topobathymetric surfaces representing the actual reservoir condition. This integrated monitoring approach enables consistent spatial comparison and supports reliable performance assessment, in accordance with international best practices [1]. Modeled beach-slope acceptance criteria are defined as a function of distance from the discharge point: on the beach, four slope zones are considered, 2% from 0 to 250 m, 1.7% from 250 to 450 m, 1.4% from 450 to 650 m, and 1% beyond 650 m up to the pond; within the pond, three additional slope zones apply, 2.3% for the first 200 m, 1.1% from 200 to 450 m, and 0.42% beyond 450 m. Tailings disposal is currently carried out through three discharge points, operated under continuous operational vigilance of disposal metrics, with manual readings taken at multiple measurement locations to determine when a given point is exhausted. Once a discharge point is deemed exhausted, its valve is closed and disposal is redirected to the next available point; pipeline extensions may also be performed during the operation of a single point, after which the newly constructed discharge point is brought into service.

3.3 Geometric reconciliation and indicators

Planned (Muk3D Software – MineBridge Software Inc.) and measured surfaces are spatially compared using geometric reconciliation techniques, enabling the classification of tailings volumes into three components: Planned Executed (PE), corresponding to the volume deposited within the planned geometry; Executed Not Planned (ENP), representing deposition outside the planned limits; and Planned Not Executed (PNE), corresponding to planned storage volume that was not effectively occupied (see Figure 3). These components provide the basis for calculating three key performance indicators adapted from mine planning by Nader et al. [4] and applied to tailings disposal: the Adherence Index (AI), which expresses the proportion of executed disposal that complied with the planned geometry; the Compliance Index (CI), which expresses the proportion of the planned disposal volume that was effectively executed; and the Effectiveness Index (EI), which expresses the overall geometric performance of the disposal process by combining both adherence and compliance.

The indicators are calculated as follows:

$$AI = PE / (PE + ENP)$$

$$CI = PE / (PE + PNE)$$

$$EI = (AI + CI) / 2$$

Together, these metrics provide an objective assessment of disposal performance by distinguishing between operational deviations outside the plan and unexecuted planned volumes. The Effectiveness Index, calculated as the average of AI and CI, consolidates both perspectives into a single composite indicator of overall geometric performance, providing a concise metric for tracking the combined evolution of adherence and compliance over time. Their periodic calculation supports the identification of spatial and temporal trends, allowing deviations from the disposal strategy to be quantified and incorporated into subsequent operational decision-making.

The computational workflow adopted for geometric reconciliation comprises the following steps: topobathymetric survey data are collected and processed using Pix4D to generate the measured surface; the tailings disposal plan is converted into a processable planned surface using Muk3D; the planned and measured surfaces are compared using Deswik.CAD to classify PE, ENP, and PNE volumes; and the resulting geometric differences are represented as heat maps, from which the AI, CI, and EI indicators are calculated using the Deswik Suite for Mining and used for reporting.

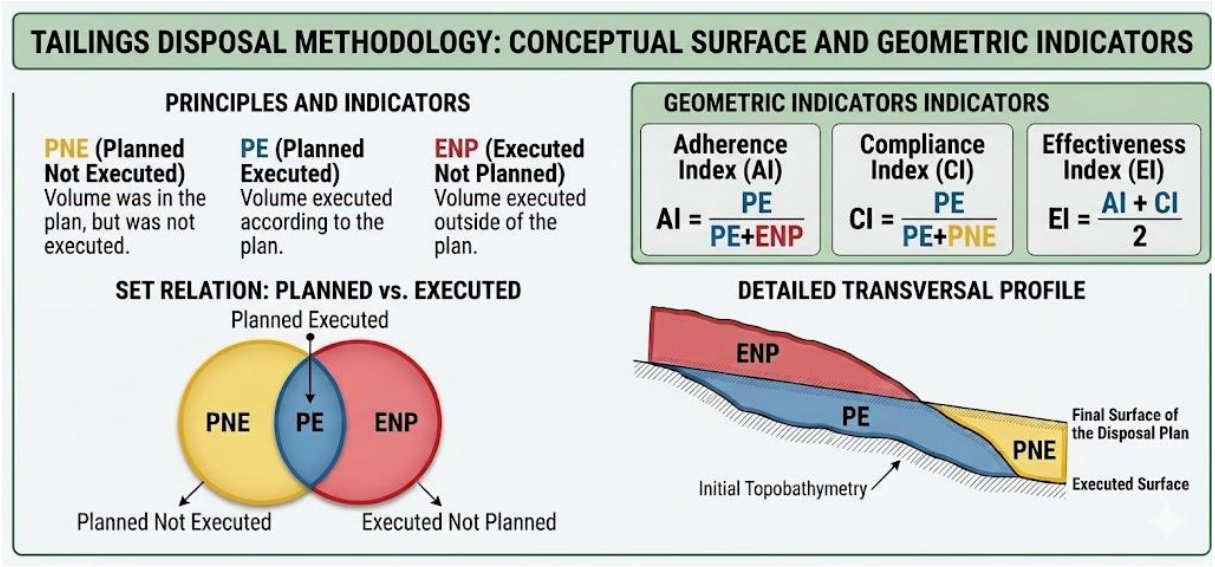


Figure 3 - Conceptual example of a tailings beach profile and geometric parameters.

3.4 PDCA cycle structuring

The methodology is structured according to the PDCA cycle (Figure 4). Planning defines geometric and environmental targets; execution corresponds to disposal operations; checking involves topobathymetric monitoring and indicator calculation; and action comprises operational adjustments and plan revisions, focusing on minimizing deviations, improving predictability, and reducing potential environmental impacts [1]. Among the environmental impacts addressed by this approach are dust generation and additional disturbance associated with mechanized corrective interventions, as well as uncertainties in final landform configuration arising from geometric deviations between planned and executed surfaces; by minimizing such

deviations, the methodology reduces the frequency and intensity of corrective earthworks and supports more predictable closure landforms.

When Executed Not Planned (ENP) volumes are identified, the Act phase is triggered through two complementary actions: the disposal plan is updated to incorporate revised operational strategies that prevent recurrence, and a root-cause analysis is conducted to determine the operational factors that led to the deviation. These actions feed back into the Plan phase, generating new PDCA cycles that progressively reduce ENP occurrences over time.

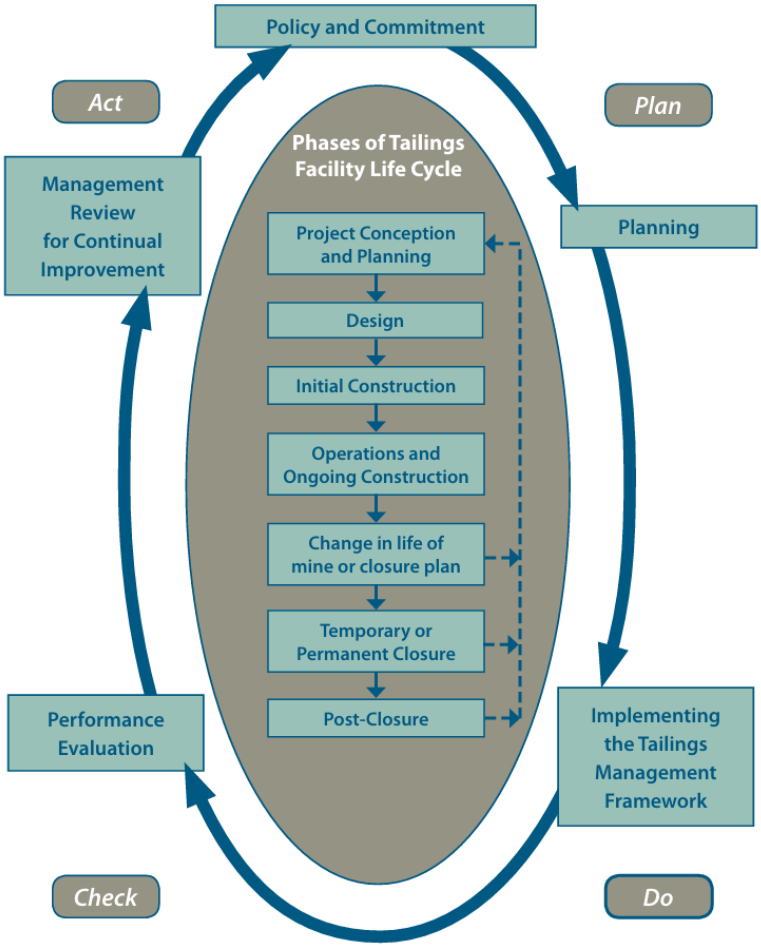


Figure 4 – PDCA-based methodology flowchart applied to tailings disposal from Mining Association of Canada (2021).

4. RESULTS

The method application enabled systematic identification of spatial and temporal distribution of deviations between the disposal plan and the geometry effectively executed. Performance indicators highlighted periods of greater adherence associated with operational stability, as well as situations requiring adjustments due to changes in discharge conditions, production rates, or operational constraints [4].

From an environmental perspective, results show that improved volumetric occupation predictability reduces the need for mechanized corrective interventions, which are often associated with increased material handling, higher energy consumption, and potential environmental impacts such as dust generation and additional disturbance [6]. Furthermore, maintaining geometries closer to planned conditions favors early compliance with progressive closure and long-term stability criteria, thereby reducing uncertainties in final landform configuration [2].

The evaluation of performance indicators in the Sossego Copper Tailings Dam over time reveals a consistent trend of improvement in the execution of the disposal plan (Figure 5). The Adherence Index (AI) showed progressive improvement, increasing from 75.2% in the beginning of 2025 to 97.6% in the beginning of 2026, indicating greater convergence between the executed and planned geometry. In a similar manner, the Compliance Index (CI) recorded a gradual increase, rising from 67.6% to 87.4% over the same period, which reflects enhanced operational compliance with the defined parameters. Consequently, the Effectiveness Index (EI) also exhibited continuous growth, increasing from 71.4% to 92.5%, demonstrating an overall improvement in process performance.

It should be noted that a marked, temporary reduction in the indicators was observed at one point during the series, followed by a subsequent recovery; this reduction occurred because the tailings disposal plan under comparison had been developed too far ahead relative to the topobathymetric survey used for reconciliation (Figure 6), which temporarily reduced the Compliance Index (and, consequently, the Effectiveness Index) until the plan was updated to reflect more current conditions. These results reinforce the applicability of the proposed method as a support tool for geometric control and operational predictability, contributing to operational stability and to the reduction of uncertainties associated with the final configuration of disposal structures.

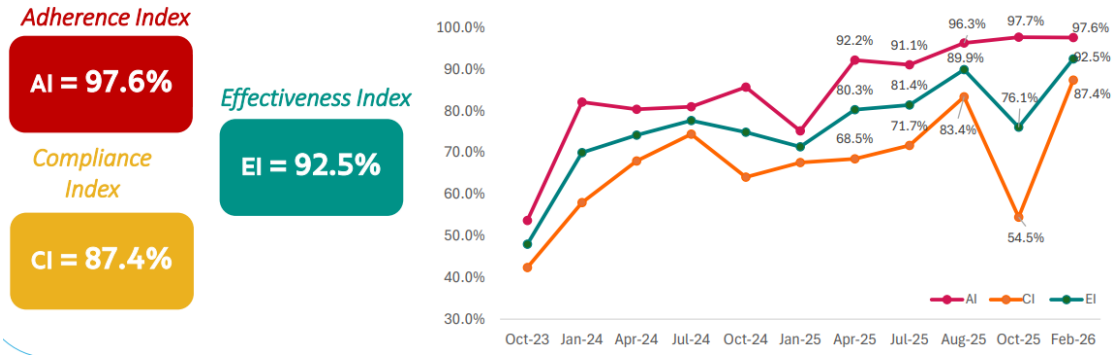


Figure 5 – Evaluation of performance indicators in the Sossego Copper Tailings Dam between 2023 and 2026. Note: The performance indicators depicted in Figure 5 should be interpreted with consideration for operational variability. Periodic recalibration of the geometric simulation model is necessary, as fluctuations in ore feed, plant operations, and disposal flow rates can significantly affect tailings behavior and adherence to planned geometry.

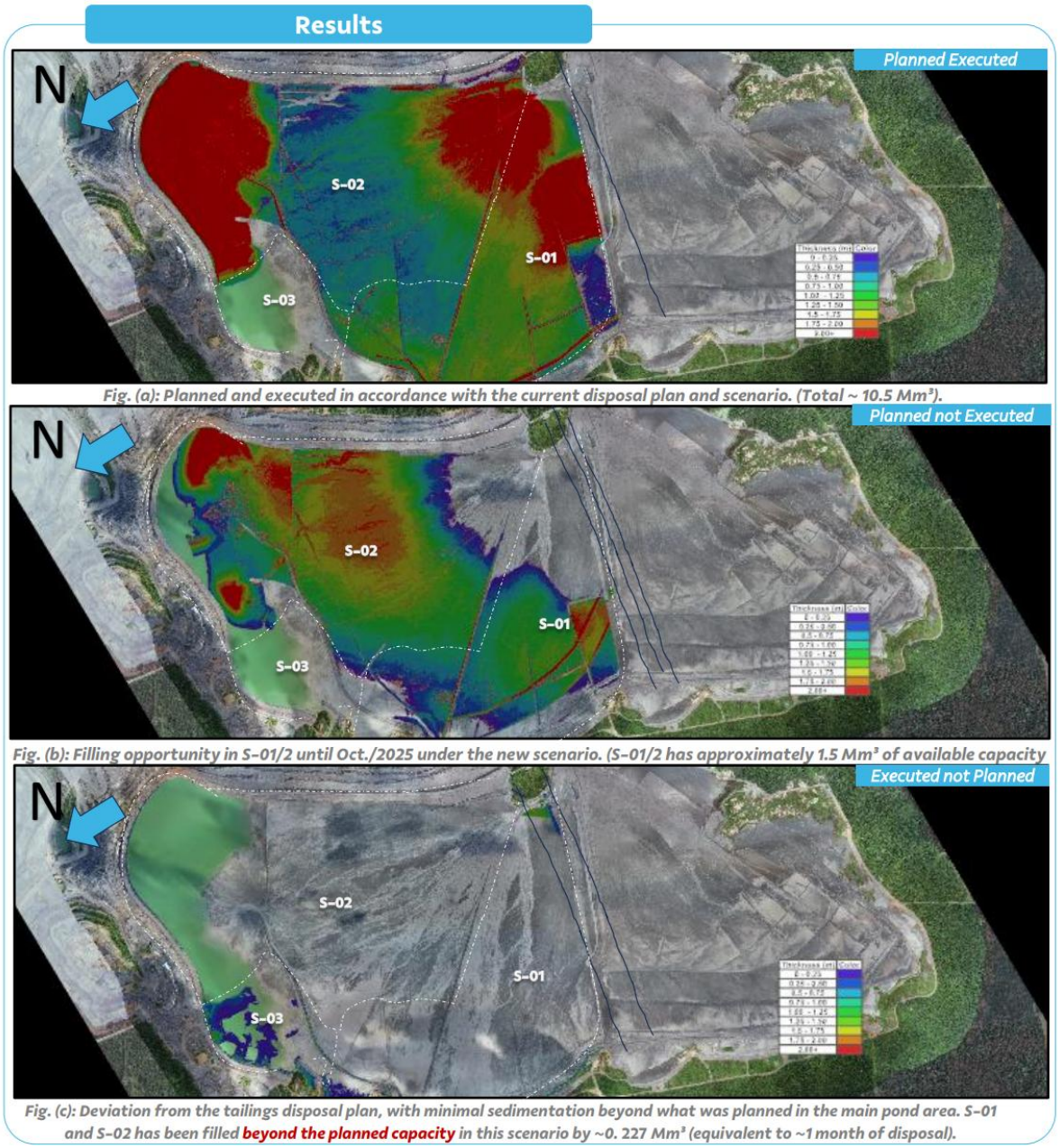


Figure 6 – Heat Map highlighting differences between planned and executed surfaces.

5. DISCUSSION

The obtained results corroborate technical literature by demonstrating that indicator-based management is an effective tool to address uncertainties inherent to tailings disposal in large reservoirs [4]. By acting directly on operational processes, the proposed methodology contributes preventively to reducing future environmental risks, namely, dust generation and additional disturbance from mechanized corrective interventions, and uncertainties in final landform configuration arising from geometric deviations, while aligning with international tailings management and closure guidelines [1], [6].

Integration between planning, monitoring, and indicators enables operational decisions to be based on quantitative evidence, strengthening dam governance and creating

more favorable conditions for environmentally responsible closure [2]. In this context, the Sossego Tailings Dam experience demonstrates the applicability of the approach as a good environmental and operational management practice for large-scale facilities, particularly in contexts where long-term closure performance is a critical objective.

Tailings disposal plans are developed through geometric simulations, ensuring compatibility among:

- Surface geometry of tailings at the time of topo-bathymetric survey;
- Physical properties: Rheological parameters, particle size distribution, specific gravity;
- Operational data: Solids concentration, discharge rate;
- Reference historical data: Theoretical and measured repose angles.

It is important to note that adherence indices should also be employed to promote continuous recalibration of the model, since variability in ore feed to the beneficiation plant, operational variability within the plant, and disposal flow rates can influence tailings behavior.

6. CONCLUSIONS

The application of environmental management practices based on performance indicators in tailings disposal proved effective in improving volumetric occupation predictability of large reservoirs and reducing the need for corrective interventions [4]. The PDCA-structured methodology integrates planning, operation, and monitoring, acting preventively on potential environmental impacts and supporting progressive dam closure in accordance with international guidelines [1].

Results from the Sossego Copper Mine Tailings Dam indicate that the approach can be replicated at other large tailings facilities, contributing to strengthening environmental management, enhanced operational efficiency, and improved governance throughout the lifecycle of such structures [2].

7. REFERENCES

[1] International Council on Mining and Metals – ICMM (2020). Global Industry Standard on Tailings Management.

[2] Morrison, K. F.; Lammers, H. (eds.) (2022). Tailings Management Handbook – A Life Cycle Approach. SME.

[3] Li, A. L. (2011). “Prediction of Tailings Beach Slopes and Tailings Flow Profiles”. In: Paste 2011 – Proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Australian Centre for Geomechanics.

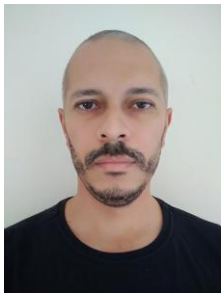
[4] Reis, V. C.; Nader, B. (2023). “Performance indicators and their importance for effective short-term and operational mine planning”. REM – International Engineering Journal, 76(1), 101–107.

[5] Mussé, M. (2020). “Tailings Deposition Planning”. In: Morrison, K. F.; Lammers, H. (eds.). Tailings Management Handbook – A Life Cycle Approach. SME.

[6] Andrews, D. et al. (2020). “Closure Planning and Landform Design”. In: Morrison, K. F.; Lammers, H. (eds.). Tailings Management Handbook – A Life Cycle Approach. SME.

[7] Robertson, P. K.; de Melo, L.; Williams, D. J.; Wilson, G. W. (2019). Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I.

	**BARBOSA, Felipe Campolina** Mining Engineer, graduated in Geotechnics, MBA in Business Management and Master’s student at UFOP (Geomechanics and Seismology). Experience in Soil/Rock Mechanics and Hydrogeology, having worked in over 23 mines and projects across Brazil. Currently, corporate manager of geotechnical services at Vale Metais Bases.
	**BELOTTO, Gustavo** MSc candidate in Geotechnical & Geoenvironmental Engineering (UFRGS), Civil Engineer (FURG), with M.Eng specializations in Geotechnics (PUC Minas) and Mining (UFOP), plus AUSIMM certification in Tailings Management. Over 5 years’ experience in TSF design, dam safety, inspections, water/tailings management, risk analysis, and geotechnical instrumentation & monitoring projects.
	**RODRIGUES, João Paulo** Geotechnical engineer with over 15 years of experience in tailings management and dam engineering. Holds degrees in Mining and Civil Production Engineering, a MSc in Geotechnics, and PhD in Geotechnics. Currently works in technical management of tailings facilities, focusing on dam safety, geotechnical projects and hydrogeological practices.

	**OLIVEIRA, Dfferson** Graduated Civil Engineer (UNISA), MBA in Project Management and Geotechnical Engineering (FAC), studying MBA in Geoprocessing (PUC Minas). With more than 19 years of experience in the mining sector, integrated expertise in operational geotechnics, engineering projects, monitoring, geoprocessing and risk management applied to landfills, dams and other geotechnical structures.
	**FERREIRA, Juliano** Civil Engineer, graduated from the University of São Paulo (USP), with a postgraduate degree in Dam Engineering from the Pontifical Catholic University of Minas Gerais (PUC Minas) and an MBA in Project Management from Fundação Getulio Vargas (FGV). Brings over 15 years of experience in engineering projects and dam safety, with a strong background in planning, execution, and operational control.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

A PROBLEMÁTICA NO TRATAMENTO DE ANOMALIAS NOS DIVERSOS COMPONENTES EM BARRAGENS DE TERRA, PRINCIPALMENTE EM TALUDES, DURANTE PERÍODO DE INVERNO AMAZÔNICO – O EXEMPLO DA REGIÃO DE PARAGOMINAS/PA

Carla Tatiani Do Carmo PEREIRA
Analista Ambiental - Secretaria de Meio Ambiente, Clima e Sustentabilidade do Pará

Francisca Solange Gomes CHAVES
Analista Ambiental - Secretaria de Meio Ambiente, Clima e Sustentabilidade do Pará

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar métodos exequíveis e acessíveis, especialmente aos pequenos proprietários, para obtenção de informações sobre as condições de implantação, características construtivas e segurança de barragens de pequeno porte no município de Paragominas/PA. O estudo baseou-se em dados de fiscalizações ambientais realizadas diretamente pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Clima e Sustentabilidade do Pará (SEMAS/PA), com inspeções de campo realizadas em 2021, 2022, 2023 e 2025. Foram fiscalizadas 26 barragens de terra, distribuídas em 19 propriedades, constituindo o universo de estruturas avaliadas em campo. As inspeções permitiram identificar e sistematizar anomalias nos diferentes componentes das barragens, com destaque para os taludes, possibilitando reconhecer as estruturas e condições que demandam maior atenção para medidas preventivas e corretivas. Entre as ocorrências observadas destacaram-se processos erosivos, deficiência de proteção superficial, vegetação inadequada, fissuras e trincas. A análise das condições encontradas permitiu discutir alternativas de tratamento, especialmente para os taludes, considerando as características das estruturas e o período de maior precipitação pluviométrica, denominado inverno amazônico. Os resultados evidenciam a importância da fiscalização sistemática de barragens de pequeno porte, sobretudo aquelas com insuficiência de documentação construtiva e histórico de monitoramento, e reforçam a necessidade de programas públicos de assistência técnica e fomento aos pequenos proprietários, visando à produção de informações, manutenção preventiva e redução dos riscos associados às estruturas.

ABSTRACT

This study aimed to analyze feasible and accessible methods, particularly for small landowners, to obtain information on the implementation conditions, construction characteristics, and safety of small dams in the municipality of Paragominas, Pará, Brazil. The study was based on data from environmental inspections conducted directly by the Pará State Secretariat for Environment, Climate and Sustainability (SEMAS/PA), including field inspections carried out in 2021, 2022, 2023, and 2025. A total of 26 earth dams located on 19 properties were inspected, representing the set of structures evaluated in the field. The inspections enabled the identification and systematization of anomalies in different dam components, particularly slopes, allowing the identification of structures and conditions requiring greater attention for preventive and corrective measures. The main occurrences included erosion

processes, inadequate surface protection, inappropriate vegetation, fissures, and cracks. The analysis of the observed conditions allowed the discussion of treatment alternatives, particularly for slopes, considering the characteristics of the structures and the period of highest rainfall, known as the Amazonian rainy season. The results highlight the importance of systematic inspection of small dams, especially those with insufficient construction documentation and monitoring records, and reinforce the need for public technical assistance and support programs for small landowners, aimed at improving information availability, preventive maintenance, and risk reduction associated with these structures.

1. INTRODUÇÃO

As barragens de terra são estruturas utilizadas há milênios para a retenção de água, destacando-se por sua simplicidade construtiva e por serem frequentemente empregadas em projetos de pequeno e médio porte. No Brasil, elas representam a maior parte dos empreendimentos voltados ao armazenamento de água para fins diversos, como irrigação, abastecimento, aquicultura e uso industrial. No entanto, sua aparente simplicidade não deve ser confundida com ausência de riscos, especialmente em regiões sujeitas a intensos eventos pluviométricos e com geologia (alta saturação dos solos) e ocupação territorial complexas, como é o caso da região amazônica.

A região de Paragominas, no estado do Pará, tem se mostrado especialmente vulnerável a esse tipo de problemática. A combinação entre alta pluviosidade, solos de baixa coesão e ausência de práticas adequadas de manutenção tem gerado um cenário propício ao desenvolvimento de anomalias estruturais nas barragens de terra. Os taludes, elementos cruciais para a estabilidade dessas estruturas, são os mais afetados, apresentando anomalias como erosões, escorregamentos, abatimentos e presença inadequada de vegetação, além da frequente ausência de dispositivos de proteção como o *rip rap*.

1.1 Breve Histórico

A ocorrência de eventos extremos, como o registrado em abril de 2018, quando chuvas de 156 mm em duas horas provocaram o rompimento em cascata de diversas barragens em Paragominas, reforça a necessidade de atenção redobrada. Na ocasião, mais de 350 famílias foram afetadas, havendo inclusive a perda de vidas humanas. Esses eventos demonstram a importância de um monitoramento constante, aliado a intervenções técnicas adequadas e políticas públicas voltadas à prevenção de desastres.

2. METODOLOGIA APLICADA

Em resposta a esse cenário, estudo de campo realizado entre os anos de 2021, 2022, 2023 e 2025 identificou 26 estruturas de contenção fiscalizadas pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará (SEMAS/PA) em 19 propriedades do município de Paragominas. Todas as barragens eram do tipo terra e apresentavam, em maior ou menor grau, sinais de deterioração. Os dados revelaram a ocorrência de fissuras, trincas, galgamentos, processos erosivos intensos e falhas estruturais tanto nos taludes de montante quanto nos de jusante.

As Figuras 1 e 2 ilustram as principais anomalias identificadas nos taludes de jusante e montante, respectivamente. Figura 3 demonstra algumas observações em campo.

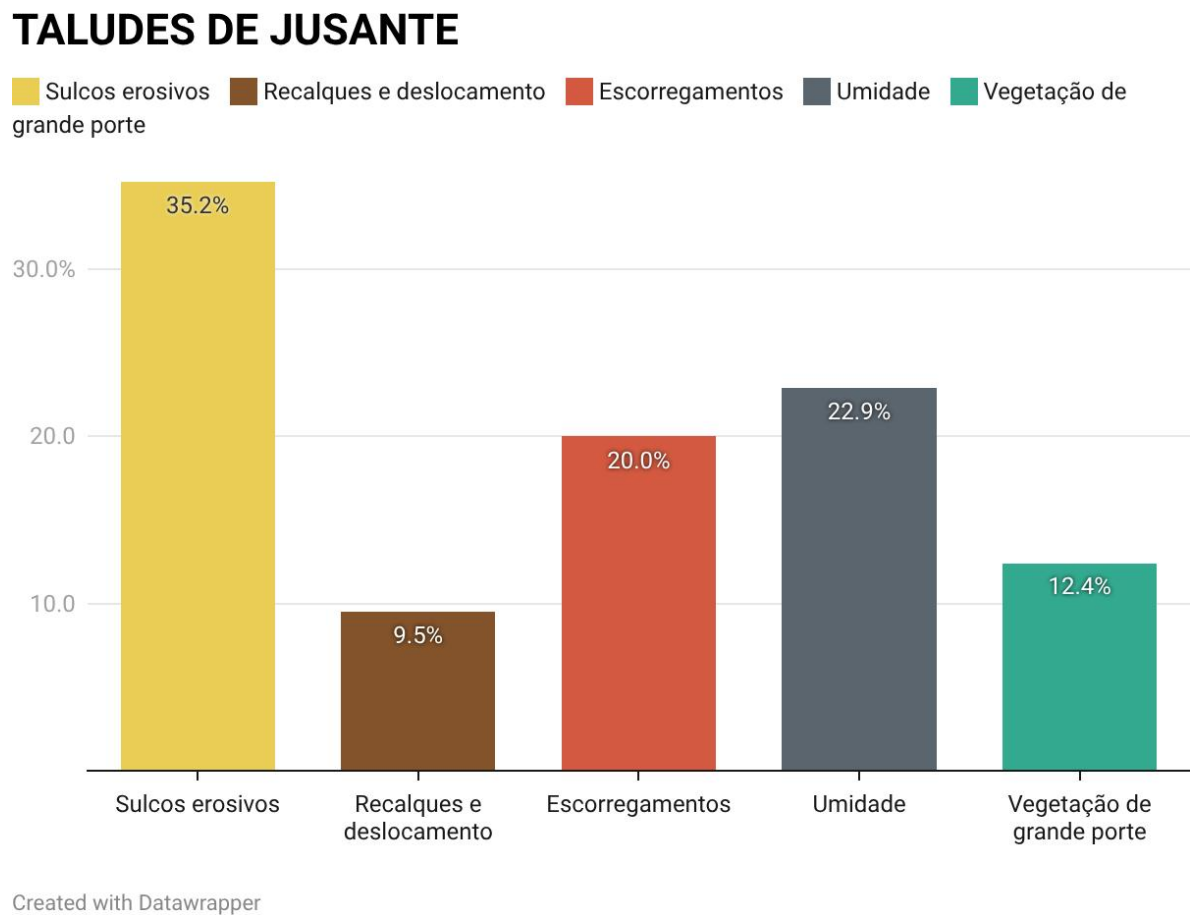


Figura 1 – Principais anomalias encontradas nos taludes de jusante das barragens (Fonte: SEMAS/PA)

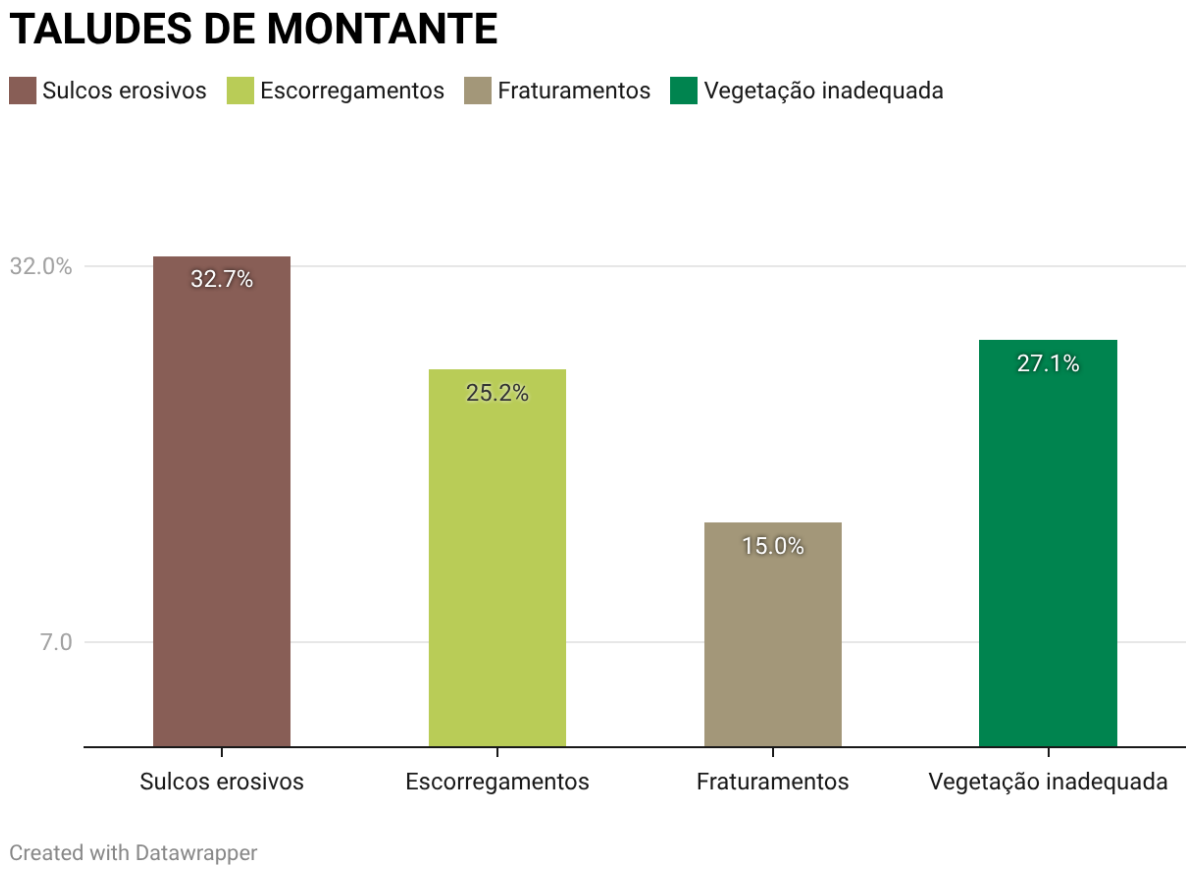


Figura 2 – Principais anomalias encontradas nos taludes de montante das barragens (Fonte: SEMAS/PA)



Figura 3 – Observações de anomalias encontradas nos taludes em campo (Fonte: SEMAS/PA)

Essas observações possibilitam relacionar o nível de urgência dos reparos com a localização das falhas nos taludes de jusante e montante, segundo o interesse e a responsabilidade do proprietário. Além de resumir as principais anomalias encontradas em todos os taludes analisados.

Com base nesse levantamento, torna-se evidente a necessidade de aplicação imediata de técnicas alternativas de estabilização. A [1] orienta sobre o estudo e controle da estabilidade de encostas e taludes. Em Paragominas, observa-se a ausência de estudos prévios e de projetos que considerem as condições reais às quais essas barragens são submetidas. Essa deficiência de documentação e de suporte técnico constitui um fator relevante para a gestão da segurança das estruturas, uma vez que limita a compreensão das condições de implantação, das características dos materiais empregados, dos critérios de dimensionamento e do comportamento esperado dos diferentes componentes da barragem.

A ausência de estudos e projetos adequados também dificulta a realização de avaliações consistentes quanto à estabilidade dos taludes, ao comportamento dos sistemas de drenagem, à capacidade dos dispositivos hidráulicos e à evolução de processos de deterioração identificados durante as inspeções. Em barragens de pequeno porte, essa situação pode ser ainda mais significativa, considerando que muitas estruturas são implantadas com reduzido acompanhamento técnico e, posteriormente, submetidas a condições operacionais e ambientais distintas daquelas inicialmente previstas, incluindo os elevados volumes de precipitação característicos do período chuvoso amazônico.

Nesse contexto, a inexistência ou insuficiência de documentação técnica não deve ser compreendida apenas como uma lacuna administrativa, mas como um elemento que interfere diretamente na capacidade de diagnóstico, monitoramento e tomada de decisão relacionada à segurança da barragem. A ausência de parâmetros de projeto e de informações sobre as condições originais da estrutura torna mais complexa a identificação de alterações no comportamento dos taludes, dos dispositivos de drenagem e das demais estruturas componentes, dificultando a definição de medidas corretivas proporcionais à natureza e à evolução das anomalias observadas.

Esse cenário evidencia um dos principais desafios associados à gestão de barragens de pequeno porte em operação na região de Paragominas/PA “a necessidade de compatibilizar a realidade construtiva e operacional das estruturas existentes com procedimentos sistemáticos de avaliação, monitoramento e manutenção da segurança”. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a importância da realização de levantamentos técnicos, avaliações de estabilidade e inspeções periódicas, especialmente em estruturas submetidas a condições hidrológicas severas, de modo a subsidiar a identificação preventiva de vulnerabilidades e a adoção tempestiva de medidas de controle e correção.

A instabilidade pode ser causada por fatores externos (como modificações geométricas, retirada de vegetação, variação climática) ou internos (como erosão interna, variações no nível d'água ou liquefação). Ações recomendadas incluem modificações geométricas, instalação de sistemas de drenagem e reforço do maciço [2].

Segundo [4] duas técnicas destacam-se como alternativas de caráter paliativo para o controle dos processos erosivos observados nas estruturas avaliadas: o rip rap e o revestimento vegetal. A escolha entre essas soluções, entretanto, deve considerar a localização da erosão, as características do talude, a intensidade do escoamento superficial ou da ação hidráulica, as condições de drenagem e o estágio de evolução do processo erosivo, não devendo ser aplicada de maneira indistinta aos diferentes componentes da barragem.

O rip rap constitui uma solução particularmente aplicável à proteção do talude de montante, sobretudo em setores sujeitos à ação direta da água e à variação do nível do reservatório. A utilização de materiais granulares ou elementos de proteção, inclusive sacos de solo-cimento, pode reduzir a ação erosiva sobre a superfície do talude e limitar a desagregação do solo. Sua aplicação é mais adequada em locais nos quais a erosão esteja associada predominantemente à ação hidráulica e nos quais seja possível garantir adequada acomodação e estabilidade do material de proteção. A execução deve ser precedida de avaliação das condições do talude, uma vez que o revestimento superficial não substitui intervenções estruturais quando houver instabilidade, deformações significativas, processos erosivos profundos ou comprometimento do maciço.

No talude de jusante, por sua vez, o revestimento vegetal pode constituir alternativa de baixo custo para a proteção superficial contra a erosão provocada principalmente pelo escoamento das águas pluviais. O estabelecimento de cobertura vegetal por meio de gramíneas contribui para reduzir a velocidade do escoamento superficial, proteger o solo contra o impacto direto das gotas de chuva e favorecer a retenção de partículas, diminuindo a formação e a progressão de sulcos e ravinamentos. Essa solução apresenta maior aplicabilidade em superfícies com declividades compatíveis, solos relativamente estáveis e processos erosivos ainda predominantemente superficiais.

A adoção do revestimento vegetal, contudo, exige condições mínimas para seu estabelecimento e manutenção, incluindo preparo adequado da superfície, seleção de espécies adaptadas às condições locais, controle inicial do escoamento superficial e manutenção periódica da cobertura. A presença de vegetação, isoladamente, não deve ser considerada medida suficiente quando já existem ravinas profundas, surgências, concentração intensa de fluxo, instabilidade do talude ou evidências de processos de percolação que possam comprometer a integridade da estrutura. Nessas situações, torna-se necessária a avaliação técnica da causa do processo e a adoção de medidas de drenagem, estabilização ou recuperação compatíveis com o mecanismo identificado.

Nesse sentido, o rip rap e o revestimento vegetal devem ser compreendidos como medidas de proteção superficial, cuja eficácia está condicionada à correta identificação do mecanismo erosivo e às características específicas de cada talude. O rip rap apresenta maior potencial de aplicação nos setores submetidos à ação hidráulica mais intensa, especialmente no talude de montante, enquanto a cobertura vegetal mostra-se mais apropriada para o controle do escoamento superficial e da erosão pluvial em taludes de jusante com condições adequadas de estabilidade. Ambas as técnicas podem apresentar vantagens relacionadas ao baixo custo

relativo e à possibilidade de utilização de recursos e mão de obra disponíveis localmente, desde que sua implantação seja precedida de avaliação técnica e acompanhada de manutenção e monitoramento.

Para Rodrigues [3], o revestimento vegetal constitui um dos meios mais simples de proteção dos taludes contra a erosão provocada pelas águas da chuva e do vento. De maneira geral, solos desprovidos de cobertura vegetal permanecem mais suscetíveis aos processos erosivos, sobretudo quando submetidos ao impacto das precipitações e ao escoamento superficial. No contexto das barragens avaliadas em Paragominas, essa condição assume particular relevância diante da elevada ocorrência de precipitações durante o período chuvoso amazônico, reforçando a necessidade de adoção de medidas preventivas e de manutenção compatíveis com as características de cada estrutura.

3. CONSIDERAÇÕES E RESULTADOS

O diagnóstico das anomalias identificadas nas 26 barragens fiscalizadas pode subsidiar ações práticas de gestão e segurança, especialmente por meio da definição de critérios para o direcionamento das fiscalizações e para a priorização das intervenções corretivas. A sistematização das ocorrências permite identificar os componentes com maior frequência de anomalias e aqueles que apresentam condições potencialmente mais críticas, contribuindo para estabelecer prioridades de acompanhamento, manutenção e recuperação. Os resultados podem ainda auxiliar na definição de estratégias de fiscalização orientadas pelo risco, permitindo concentrar esforços técnicos nas estruturas ou componentes que apresentem maior recorrência ou gravidade de anomalias. Essa abordagem favorece maior racionalidade na aplicação dos recursos públicos e amplia a capacidade preventiva da fiscalização ambiental.

Outro resultado potencialmente relevante é a utilização do diagnóstico como subsídio para a formulação de programas públicos de apoio técnico aos proprietários de barragens de pequeno porte. A identificação dos problemas recorrentes permite estruturar ações de orientação, capacitação, assistência técnica e fomento de acordo com as necessidades efetivamente observadas em campo.

Dessa forma, os dados produzidos pela fiscalização ultrapassam a finalidade de registro das condições encontradas e podem constituir instrumento de planejamento preventivo, contribuindo para a definição de estruturas prioritárias para acompanhamento, para o estabelecimento de medidas corretivas e para a redução dos riscos associados às barragens de pequeno porte.

Além das intervenções imediatas destinadas ao controle das anomalias identificadas, a gestão da segurança das barragens de pequeno porte requer ações permanentes de cadastro, monitoramento, manutenção e acompanhamento técnico. Entre essas medidas destacam-se o mapeamento e a atualização cadastral das estruturas existentes, a elaboração e manutenção dos Planos de Segurança de Barragens, quando aplicáveis, e o incentivo à adoção de sistemas de monitoramento compatíveis com as características e o porte de cada estrutura.

Mesmo instrumentos simples, como réguas linimétricas, piezômetros manuais e

inspeções visuais periódicas, podem contribuir para o acompanhamento da evolução das condições da barragem, desde que adequadamente instalados, utilizados e interpretados. Da mesma forma, tecnologias como drones e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) podem auxiliar na obtenção de informações espaciais, no registro das condições dos componentes e na identificação de áreas potencialmente vulneráveis.

A adoção dessas medidas deve estar associada à capacitação dos proprietários e à disponibilidade de assistência técnica, sobretudo para estruturas de pequeno porte que não disponham de equipes especializadas. Nesse sentido, programas públicos de apoio podem contribuir para ampliar o acesso aos levantamentos necessários, fortalecer a cultura de prevenção e reduzir as limitações relacionadas à ausência de documentação e monitoramento.

A gestão da segurança de barragens deve considerar todas as etapas do ciclo de vida da estrutura, não se restringindo aos períodos de implantação e operação. Nesse contexto, o descomissionamento e a descaracterização constituem alternativas que podem contribuir para a prevenção e a redução de riscos quando a continuidade da operação deixa de ser tecnicamente, ambientalmente ou funcionalmente justificável.

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010 e posteriormente aprimorada pela Lei nº 14.066/2020, incorporou a etapa final do ciclo de vida das estruturas ao estabelecer responsabilidades relacionadas à segurança até a desativação ou descaracterização. O empreendedor permanece responsável pela segurança da barragem até a completa descaracterização da estrutura, conforme os requisitos legais aplicáveis.

Essa evolução normativa demonstra que a segurança de barragens não deve ser compreendida apenas sob a perspectiva da manutenção das estruturas em operação, mas também pela adoção de estratégias capazes de eliminar ou reduzir riscos quando sua permanência deixa de ser justificável. O descomissionamento pode assumir especial relevância em estruturas antigas, construídas sem projeto executivo, documentação *as built* ou histórico sistemático de monitoramento geotécnico.

Entretanto, a ausência de documentação técnica não deve ser interpretada como fundamento automático para o descomissionamento. A inexistência de projeto executivo ou de registros históricos constitui fator de incerteza que justifica investigação, diagnóstico e avaliação técnica mais aprofundados. A decisão quanto à manutenção, recuperação, desativação ou descaracterização deve considerar as características concretas da estrutura e os riscos identificados.

Para essa avaliação, devem ser considerados, entre outros aspectos, a condição de conservação, a estabilidade geotécnica, o funcionamento dos dispositivos hidráulicos e de drenagem, a finalidade atual da estrutura, as condições hidrológicas locais, o potencial de danos associado e a viabilidade técnica e econômica das intervenções necessárias.

No contexto de Paragominas, essa perspectiva assume relevância diante da existência de estruturas de pequeno porte submetidas a condições hidrológicas

severas e que podem apresentar limitações de documentação e acompanhamento histórico. Assim, o fortalecimento da fiscalização deve estar associado não apenas à identificação de anomalias e à determinação de medidas corretivas, mas também à criação de instrumentos que permitam avaliar sistematicamente quando a recuperação, a manutenção ou o descomissionamento constituem a alternativa mais adequada para a redução do risco.

4. CONCLUSÕES

A análise das barragens de terra fiscalizadas em Paragominas/PA evidencia que a segurança dessas estruturas está diretamente relacionada à qualidade da implantação, às condições de conservação, à existência de documentação técnica, ao monitoramento e à adoção de medidas preventivas e corretivas compatíveis com as características de cada barragem.

As 26 estruturas fiscalizadas em 19 propriedades permitiram identificar um conjunto diversificado de anomalias, com destaque para aquelas relacionadas aos taludes e aos processos erosivos. A sistematização dessas ocorrências demonstra que o diagnóstico produzido pelas ações de fiscalização pode ser utilizado não apenas para registrar as condições encontradas, mas também para orientar a priorização de inspeções, intervenções e medidas de manutenção.

A análise das barragens de terra fiscalizadas em Paragominas/PA evidencia que a segurança dessas estruturas está diretamente relacionada à qualidade da implantação, às condições de conservação, à existência de documentação técnica, ao monitoramento e à adoção de medidas preventivas e corretivas compatíveis com as características de cada barragem.

No período de maior precipitação pluviométrica, característico do inverno amazônico, a atenção aos taludes torna-se especialmente relevante. Medidas de proteção superficial, como *rip rap* e revestimento vegetal, podem contribuir para o controle de processos erosivos quando aplicadas de acordo com as características e limitações de cada situação. Entretanto, manifestações associadas à instabilidade, percolação, erosão interna ou comprometimento estrutural exigem avaliação técnica específica e intervenções voltadas à causa do problema.

Os resultados também demonstram a importância da ampliação do acesso dos pequenos proprietários a informações, assistência técnica e instrumentos de apoio. A implementação de programas públicos de capacitação, fomento e assistência pode contribuir para superar limitações relacionadas à ausência de documentação, monitoramento e manutenção, fortalecendo a prevenção e a segurança das estruturas.

A gestão dessas barragens deve, portanto, incorporar uma perspectiva de ciclo de vida, contemplando cadastro, implantação, operação, fiscalização, manutenção, recuperação e, quando tecnicamente justificável, desativação, descomissionamento ou descaracterização. A evolução dos instrumentos normativos relacionados à etapa final do ciclo de vida reforça a necessidade de decisões fundamentadas em avaliações técnicas e na análise dos riscos associados à permanência ou à retirada da estrutura.

Em síntese, a problemática das barragens de terra de pequeno porte em Paragominas extrapola as questões estritamente construtivas e envolve aspectos técnicos, ambientais, institucionais e socioeconômicos. O fortalecimento da fiscalização, associado à produção e sistematização de informações, à assistência técnica aos proprietários, ao monitoramento contínuo e à adoção de medidas preventivas, constitui estratégia relevante para a redução dos riscos. Nesse processo, a atuação coordenada entre Estado, proprietários, instituições técnicas, universidades e demais atores envolvidos pode contribuir para uma gestão mais preventiva, integrada e sustentável da segurança das barragens, especialmente diante das condições pluviométricas características do inverno amazônico.

5. PALAVRAS-CHAVE

Taludes, barragens de terra, inverno amazônico, Paragominas

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682:2009 –Estabilidade de encostas. Informações de catálogo. Disponível em: http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=51490. Acesso em 03/04/2024.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (ABGE). Glossário: estabilização de talude e encosta. Disponível em: http://abge.org.br/page/glossario. Acesso em 03/04/2024.

[3] RODRIGUES, B.B. (1998) – Inventário e análise de susceptibilidade aos escorregamentos de massa gravitacionais e erosão na região de Águas de Lindóia – SP – Escala 1:10.000.São Carlos, 1998. 163 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Acesso em 05/04/2024.

[4] SILVA, Rúben Alberto Fernandes da. (2012) – Aplicação da engenharia natural na estabilização de taludes. 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Exatas e da Engenharia (CCEE) da Universidade da Madeira, Funchal, Portugal, 2012. Disponível em: http://repositorio.uma.pt/bitstream/10400.13/535/1/MestradoRubenSilva.pdf. Acesso em 05/04/2024.

	**Carla Tatiani Do Carmo PEREIRA** Graduada em geologia, mestre em geologia e geoquímica ambiental pela Universidade Federal do Pará, e especialista em segurança de barragens pela Universidade Federal da Bahia. Atualmente é Analista Ambiental na Secretaria de Meio Ambiente, Clima e Sustentabilidade do Estado do Pará e coordena a equipe de fiscalização de segurança das barragens sob responsabilidade do Estado.
	**Francisca Solange Gomes Chaves** Graduada em biologia, especialista em Gestão Ambiental. Desenvolve suas atividades de Analista Ambiental na Secretaria de Meio Ambiente, Clima e Sustentabilidade do Estado do Pará, no Núcleo de Projetos e de Resiliência Climática.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

PROJETO MÃOS QUE TRANSFORMAM: EDUCAÇÃO AMBIENTAL NA CAPACITAÇÃO DE MULHERES EM REASSENTAMENTOS RURAIS IMPLANTADOS PELA UHE BELO MONTE

Andria PIMENTEL
Engenheira Ambiental – Universidade do Estado do Pará

Nubia AFRA
Administradora - Associação Internacional de Educação Continuada-AIECo

Bruno BAHIANA
Engenheiro Agricola e Ambiental - Universidade Federal Fluminense

Kesley FERREIRA
Licenciada em Ciências Biológicas – Universidade Federal do Pará

RESUMO

O Projeto Mãos que Transformam tem como público focal, as mulheres dos reassentamentos rurais, que buscam se capacitar e ter uma opção de renda que possa conciliar os cuidados da casa com o trabalho da roça abrindo assim um leque de oportunidades para a confecção de produtos que podem ser comercializados nas próprias comunidades do entorno ou em feiras municipais, além de potencializar o talento, habilidade e criatividade das mulheres da região por meio de diferentes metodologias com o olhar da educação ambiental na utilização de materiais e itens que sejam fruto de reaproveitamento ou produção local, com foco na sustentabilidade. Nesse contexto, no âmbito do Programa de Educação Ambiental (PEA) da UHE Belo Monte, é executado o Projeto Mãos que Transformam no qual foram realizadas 29 ações, dentre elas, palestras, exposições, rodas de conversas, vídeos, oficinas e workshops onde ocorreram 207 interações com o público ao longo da execução das atividades, ou seja, o mesmo público participou em mais de uma atividade. As principais ações promoveram teoria e prática na execução das oficinas, com foco no artesanato e na culinária associadas as práticas sustentáveis. Por fim, o grupo de mulheres evidenciou seu papel como agentes multiplicadoras dos conhecimentos adquiridos em seus contextos ambientais e sociais com introdução do processo de sustentabilidade.

ABSTRACT

The “Hands that Transform” Project focuses on women living in rural resettlements who seek training and a source of income that allows them to balance household responsibilities with agricultural work, opening up a range of opportunities for producing goods that can be sold within their own communities or at local fairs, while also enhancing the talent, skills, and creativity of women in the region through different methodologies grounded in environmental education, emphasizing the use of recycled or locally produced materials with a focus on sustainability; in this context, within the Environmental Education Program (PEA) of the Belo Monte Hydroelectric Plant (UHE Belo Monte), 29 activities were carried out, including lectures, exhibitions, discussion circles, videos, workshops, and training sessions, resulting in 207 interactions with participants throughout the implementation of the activities, meaning that many individuals took part in more than one action, with the main initiatives combining theory and practice in workshops focused on handicrafts and cooking associated with sustainable practices; finally, the group of women demonstrated their role as multipliers of the knowledge acquired in their environmental and social contexts, contributing to the introduction and strengthening of sustainability practices.

1. INTRODUÇÃO

A implantação da Usina Hidrelétrica Belo Monte, localizada no Pará, demandou a desocupação de algumas áreas para a formação dos reservatórios, implantação da infraestrutura logística e construção das estruturas componentes do arranjo geral do empreendimento. Nesse contexto, houve a necessidade de remanejamento das famílias para novas áreas, dando origem aos reassentamentos rurais, compostos por loteamentos localizados no município de Vitória do Xingu (PA), onde essas famílias passaram a residir e a exercer seu modo de vida pautado principalmente na agricultura.

Assim, essas famílias passaram a ser atendidas por programas e projetos, dentre eles o Programa de Educação Ambiental (PEA). Dentro do PEA existe subprojetos dentro eles o Projeto Mãos que Transformam, esse projeto tem como público focal as mulheres, especialmente dos reassentamentos rurais, que buscam capacitação e alternativas além dos afazeres domésticos e do cuidado com a roça.

De acordo com [1], a análise das desigualdades deve considerar as condições de vida e o acesso a políticas públicas das mulheres nas zonas rurais, especialmente nas regiões mais pobres do país, uma vez que esses fatores influenciam diretamente as desigualdades de gênero, sendo a implementação de políticas públicas voltadas ao público feminino de extrema relevância para a redução dessas desigualdades.

Historicamente, as mulheres mantêm um forte vínculo com a natureza, contribuindo para gestão sustentável dos recursos naturais, influenciando diretamente para a qualidade de vida e a sustentabilidade das comunidades [2].

Considerando o contexto histórico-político em que devem ser valorizadas propostas alternativas de desenvolvimento, torna-se fundamental destacar o papel que a mulher vem desempenhando nos sistemas produtivos, com ênfase na agroecologia e na sustentabilidade. Nesse sentido, a Educação Ambiental (EA) pode promover a visibilidade das relações entre gênero e meio ambiente, visto que ambos os conceitos se fundamentam em mudanças de ordem cultural, organizacional e na busca por justiça social [3].

1.1 Objetivo

Desta forma, o projeto visa abrir um leque de oportunidades para a confecção de produtos que possam ser comercializados nas próprias comunidades do entorno ou em feiras municipais, além de potencializar todo o talento, habilidade e criatividade das mulheres da região por meio de diferentes metodologias com o olhar da educação ambiental na utilização de materiais e itens que sejam fruto de reaproveitamento, produção local e de fácil acesso, com foco na sustentabilidade e conservação do meio ambiente no qual elas estão inseridas, além de caracterizar uma oportunidade de agregar na renda familiar por meio do empreendedorismo.

2. METODOLOGIA

As atividades foram desenvolvidas em módulos, de acordo com as etapas a seguir: apresentação do projeto para comunidade; diálogo e levantamento do interesse da comunidade por atividades e produtos; realização de oficinas para produção artesanal; capacitação para a comercialização dos produtos e a formatura das

artesãs. Após a conclusão dos módulos as atividades continuam acontecendo de acordo com disponibilidade da equipe de educação ambiental e das participantes.

Cada pessoa possui sua individualidade e modo de aprender, necessitando de diferentes estímulos que irão auxiliar no processo de aprendizagem e colaboração. Neste sentido, para execução das atividades, busca-se o uso de diferentes metodologias tais como palestras, rodas de conversas e utilização de vídeos interativos que auxiliem na contextualização dos conteúdos de interesse e gere um ambiente para socialização das mulheres participantes do projeto e da troca de experiências/conhecimento umas com as outras, bem como, destacamos o método das oficinas.

As atividades específicas voltadas à comercialização e às possibilidades de empreendedorismo no artesanato foram conduzidas por artesãs experientes, que atuam há muitos anos na região do Xingu.

Para avaliação da percepção dos participantes houve a aplicação de um questionário anônimo. Utilizou-se uma escala numérica de 1 a 5, conforme o exemplo abaixo, onde: 1 representa "totalmente insatisfeito" e 5 representa "totalmente satisfeito". Os pontos intermediários da escala correspondem a: "Parcialmente insatisfeito", "Indiferente", "Parcialmente satisfeito", sendo assim, os participantes atribuíram notas de 1 a 5 às questões do questionário, de acordo com seu nível de satisfação e compreensão sobre o tema.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto teve início em 2022 e encontra-se em execução, contabilizando até o momento 29 ações, onde ocorreram 207 interações com o grupo de cerca de 10 a 15 mulheres reassentadas ao longo da execução das atividades. A tabela 01 reúne as principais atividades realizadas.

Tabela 1 – Principais atividades realizadas

Metodologia	Atividade
Oficina	Reaproveitamento de plástico na confecção de vasos ornamentais
Oficina	Confecção de bolsas com reaproveitamento de papelão
Oficina	Confecção de carteira com reaproveitamento de caixa longa vida
Oficina	Produção de sabonete artesanal
Cine clube e roda de conversa	Empoderamento da Mulher
Exposição e Degustação	Geleias artesanais e utilização de PANCS (Plantas Alimentícias não Convencionais)
Oficina	Personalização de pote de vidro com reaproveitamento de filtro de café
Oficina	Produção de geleias artesanais
Cine clube e roda de conversa	Empreendedorismo feminino

Workshop	Workshop Comercialização de produtos artesanais
Oficina	Crochê com sacola
Oficina	Pesos de porta com material reaproveitável
Oficina	Reaproveitamento de vidro para confecção de vasos artesanais
Evento	Formatura
Exposição	Oficinas sustentáveis
Workshop	Culinária saudável
Oficina	Pintura em tecido
Oficina	Reaproveitamento de Garrafas de Vidro com Barbantes
Oficina	Ecojóias

As figuras a seguir registram as atividades executadas:



Figura 01: Oficina – Confecção de bolsas com reaproveitamento de papelão



Figura 02: Oficina - Produção de geleias artesanais



Figura 03: Workshop Comercialização de Produtos Artesanais



Figura 04: Oficina – Técnicas de croche com sacola



Figura 05: Oficina - Reaproveitamento de vidro para confecção de vasos artesanais



Figura 06: Cerimônia de Formatura

As principais atividades do projeto buscam promover a teoria e prática na execução das oficinas, para que as mulheres participantes possam presenciar todo o passo a passo, além de terem a oportunidade de confeccionar a peça ou produto em questão.

O foco das oficinas é o artesanato de forma sustentável, de modo a incorporar a educação ambiental no reaproveitamento de resíduos para transformação em novos itens, do lixo ao luxo, agregando ao produto valor estético e econômico, propiciando a base do conhecimento, para que elas manifestem as próprias artes futuramente. Paralelo ao artesanato, as práticas de culinária foram bem recebidas pelas participantes, as quais apresentaram interesse e aptidão às receitas propostas.

Após os encontros foi disponibilizado um material de apoio em formato de flyer ou PDF de forma online, para que posteriormente consigam consultar e executar de acordo com a disponibilidade em seus cotidianos. Também desenvolvemos o diálogo acerca de temas voltado ao protagonismo feminino na importância de empreender, da capacitação para o mercado de trabalho e na manutenção da criatividade como forma de desenvolver habilidades e cuidados com a saúde e bem-estar.

Em relação as respostas obtidas no questionário diagnóstico, 09 participantes responderam as questões referente a contribuição do projeto nos eixos habilidade, comercialização e motivação. A seguir os resultados demonstrados de acordo com as figuras 1,2 e 3.

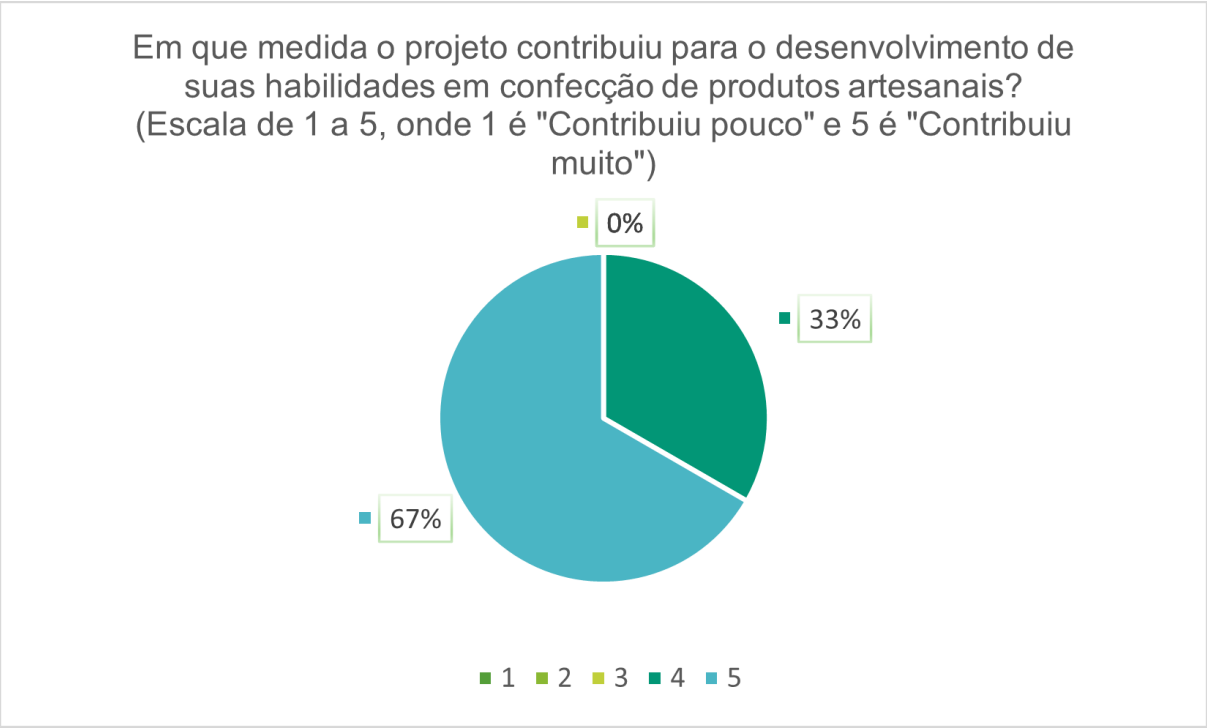


Figura 1 – Contribuição do projeto no desenvolvimento de habilidades na confecção de produtos artesanais

Os resultados demonstram que o projeto teve um impacto muito positivo no desenvolvimento das habilidades em confecção de produtos artesanais, uma vez que 67% das participantes atribuíram nota 5, enquanto 33% atribuíram nota 4. Esse cenário revela a efetividade do projeto em promover aprendizado, aprimoramento técnico e maior segurança na prática artesanal. A concentração das respostas nas notas mais altas, aliada à ausência de avaliações baixas, demonstra consistência nos resultados e sugere que o projeto atendeu ou superou as expectativas dos participantes.

Para [4], as oficinas são uma forma de construção do conhecimento que enfatiza a ação, sem perder a base teórica, desta forma, pode ser considerada uma oportunidade de vivenciar situações concretas e significativas, baseada no sentir, pensar e agir, passando a incorporar a ação e a reflexão, sendo assim, em uma oficina ocorre apropriação, construção e produção de conhecimentos teóricos e práticos vivenciadas pelo participante ou aprendiz, bem como, a vivência e execução de tarefas em equipe, ou seja, a construção coletiva de saberes [5].

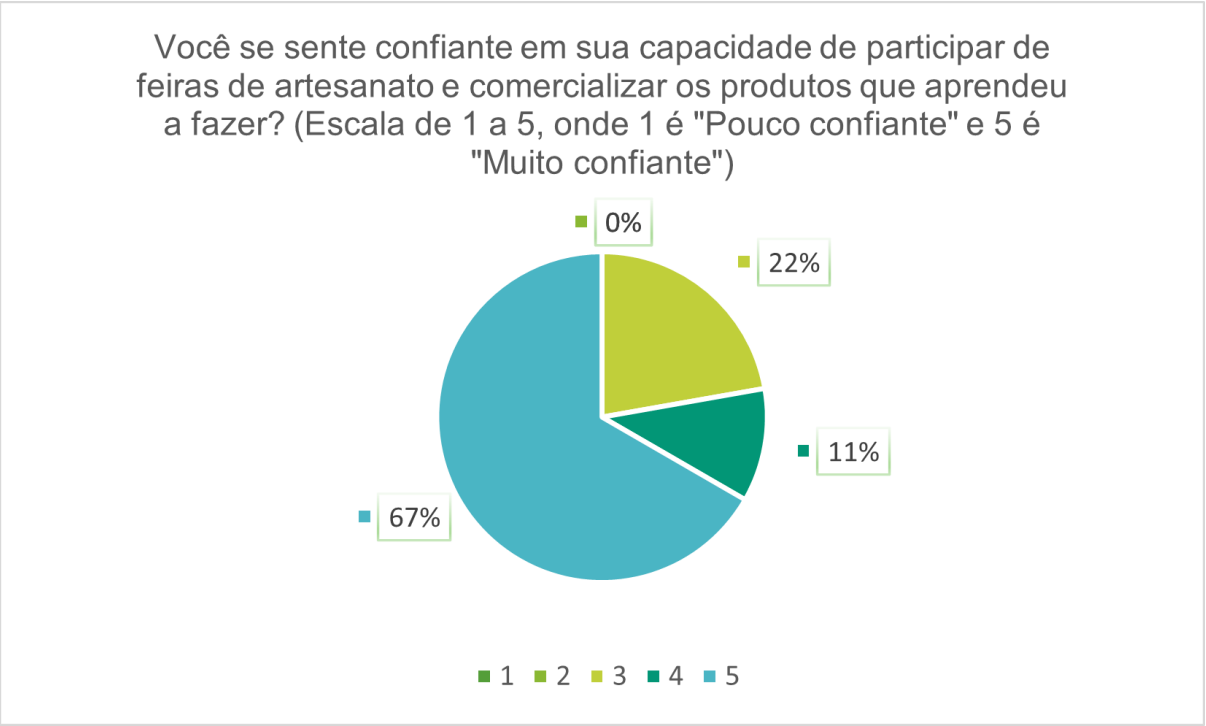


Figura 2 – Capacidade de atuação em feiras para comercialização de produtos

Como exposto, os resultados revelam um panorama positivo quanto à confiança das participantes para atuar em feiras de artesanato e comercializar seus produtos, com 67% atribuindo nota 5, o que indica um alto nível de segurança e sugere que o projeto foi eficaz não apenas no desenvolvimento técnico, mas também no fortalecimento da autonomia e da percepção de capacidade empreendedora. Os 11% que deram nota 4 reforçam essa tendência.

Por outro lado, as 22% que atribuíram nota 3 apresentam confiança moderada, indicando que, embora tenham adquirido conhecimentos e habilidades, ainda podem enfrentar inseguranças relacionadas à prática de vendas, interação com o público, ou experiência em ambientes reais de comercialização, contudo, a inexistência de avaliações baixas (notas 1 e 2) é um indicativo relevante de que nenhum participante se sente despreparado, o que reforça a efetividade do projeto.

É comum que algumas mulheres apresentem insegurança em relação à vivência em contextos reais de comercialização, seja por timidez, falta de experiência ou por outros obstáculos enfrentados. [6] constatou um elevado percentual de mulheres agricultoras que apresentam nível médio de empoderamento e empreendedorismo, identificando que para muitas delas a realidade apresenta-se com limitações marcadas por desigualdades e lacunas de gênero e pela influência desfavorável do contexto em que estão inseridas, o que compromete o desenvolvimento de suas habilidades empreendedoras, sobretudo quando enfrentam condições adversas.

Contudo, iniciativas locais de comercialização do artesanato sustentável ampliam o alcance das criações e conectam as mulheres rurais a mercados mais amplos de forma a possibilitar uma fonte de renda, assim, fortalecendo de forma individual as artesãs, mas também influenciando positivamente as comunidades que estão inseridas [7], onde as capacitações e as redes de apoio são importantes fatores para mediar o aumento da confiança das mulheres neste quesito.

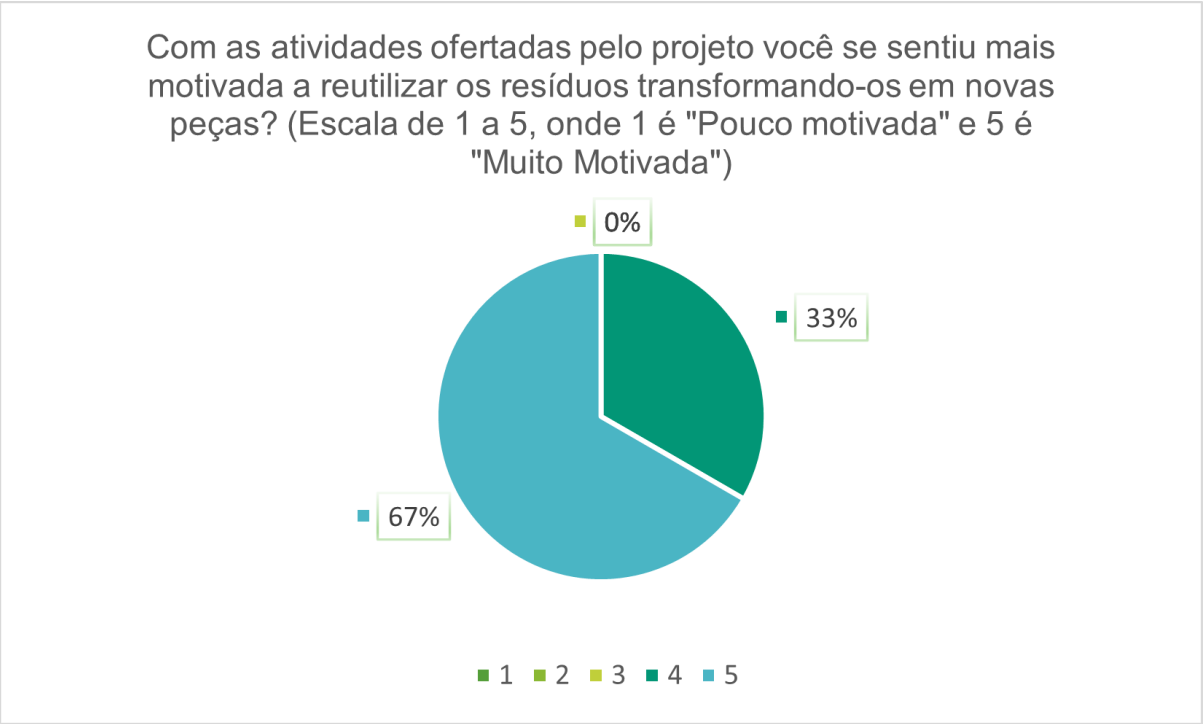


Figura 3 –Motivação para produzir peças provenientes de materiais reutilizados

Como indicado na Figura 3, os dados obtidos evidenciam que o Projeto Mãos que Transformam teve influência significativa no aumento do interesse das participantes pela reutilização de resíduos na criação de novas peças, já que 67% atribuíram nota 5, indicando um alto nível de motivação após a participação nas atividades. Além disso, 33% que deram nota 4 reforçam a efetividade das ações propostas.

A concentração das notas mais altas e a ausência de avaliações baixas apontam que a proposta do projeto foi bem compreendida e valorizada, promovendo não apenas o desenvolvimento de habilidades artesanais, mas também a sensibilização ambiental, embora ainda haja espaço para aprofundar esse engajamento e transformar a motivação em práticas contínuas e consolidadas no cotidiano das participantes.

Portanto, do ponto de vista da sustentabilidade, as oficinas de reaproveitamento de resíduos como plástico, vidro e papelão alinham-se aos princípios e objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que estabelece a redução, a reutilização e a reciclagem como estratégias de gestão ambiental, bem como incentiva o reconhecimento dos resíduos como bens econômicos e sociais, gerador de trabalho, renda e promotor de cidadania [8,9].

Ao fomentar o reaproveitamento criativo de materiais que seriam descartados, na produção de artesanatos, as oficinas contribuem para tornar esses princípios aplicados na prática, estimulando a inclusão social, terapia ocupacional, aspectos da economia circular, fonte complementar de renda, e como instrumento de conscientização para valorização dos recursos naturais dentro das comunidades [10, 11].

A promoção da igualdade de gênero e o empoderamento feminino são reconhecidos internacionalmente como elementos de destaque para o desenvolvimento sustentável. Segundo [12], alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas constitui o quinto Objetivo de Desenvolvimento Sustentável

(ODS) da Agenda 2030, que visa eliminar a discriminação e promover oportunidades equitativas para mulheres em todas as esferas da vida social, econômica e política.

Esse reconhecimento enfatiza a importância de políticas, programas e ações que fortaleçam o papel das mulheres na sociedade, incluindo iniciativas de capacitação, empoderamento e participação engajada na gestão de recursos naturais e comunitários nos contextos rurais e de vulnerabilidade social.

4. CONCLUSÕES

O projeto evidencia que a integração entre educação ambiental, artesanato sustentável e empoderamento feminino configura uma estratégia efetiva para promover o desenvolvimento social, econômico e ambiental de mulheres em comunidades rurais.

As atividades conduzidas revelaram-se espaços de aprendizagem significativos, nos quais a consciência ambiental se desenvolve paralelamente à criatividade e ao fortalecimento de vínculos comunitários. Nesse processo, as participantes não apenas aprimoraram suas habilidades, mas também consolidaram laços sociais e contribuíram para o desenvolvimento sustentável em suas comunidades, auxiliando-as no reconhecimento destas como sujeitos ativos na construção do conhecimento e de suas autonomias, dessa forma, elas passam a compreender que são protagonistas na transformação da realidade em que estão inseridas.

5. PALAVRAS-CHAVE

Sustentabilidade, comunidade, artesanato, protagonismo feminino.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] HEREDIA, B. M. A.; CINTRÃO, R. P. (2006) – “Gênero e acesso a políticas públicas no meio rural brasileiro”, Revista NERA, tema desigualdade de gênero, v. 8, Presidente Prudente, Brasil.

[2] SEMIL. (2023) – “Mulheres e meio ambiente”, Portal de Educação Ambiental, tema meio ambiente e gênero, São Paulo, Brasil.

[3] LAMIM-GUEDES, V.; INOCÊNCIO, A. F. (2013) – “Mulheres e sustentabilidade: uma aproximação entre movimento feminista e a educação ambiental”, Encontro Pesquisa em Educação Ambiental, tema educação ambiental e gênero, Rio Claro, Brasil.

[4] VALLE, H. S.; ARRIADA, E. (2012) – “Educar para transformar: a prática das oficinas”, Revista Didática Sistêmica, tema educação prática, v. 14, Brasil.

[5] VIEIRA, E.; VOLQUIND, L. (2002) – “Oficinas de ensino: O quê? Por quê? Como?”, EDIPUCRS, tema educação prática, v. 4, Porto Alegre, Brasil.

[6] RODRIGUES, H. E. et al. (2023) – “Empreendedorismo e empoderamento da mulher na agricultura familiar: estudo de caso no nordeste paraense, Amazônia

brasileira", Orbis Latina, tema empreendedorismo e gênero, v. 13, Brasil.

[7] BOAS, V. M. A. V. et al. (2024) – "Conhecendo o associativismo: o protagonismo feminino no artesanato de resíduos florestais no município de Presidente Figueiredo-AM", Nexus – Revista de Extensão do IFAM, tema associativismo e gênero, v. 10, Brasil.

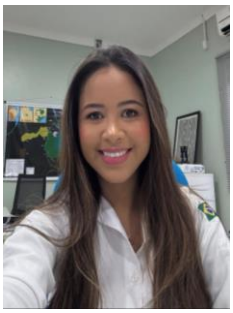
[8] BRASIL. (2010) – "Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos", Diário Oficial da União, tema gestão de resíduos sólidos, Brasília, Brasil.

[9] BRASIL. (2022) – "Decreto nº 10.936, de 28 de janeiro de 2022. Regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos", Diário Oficial da União, tema gestão de resíduos sólidos, Brasília, Brasil.

[10] COSTA, R. C. P. et al. (2020) – "Reciclagem: uma ferramenta para se trabalhar a educação ambiental de forma interdisciplinar nas escolas, promovendo a conscientização sobre a preservação do meio ambiente", Revista Brasileira de Educação Ambiental, tema educação ambiental e sustentabilidade, v. 15, Brasil.

[11] DE BORTOLI, L.; CASTAMAN, A. S. (2020) – "Oficina de arte com sucata eletrônica: uma alternativa para a educação ambiental baseada na reutilização e aprendizagem criativa", Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental (REMEA), tema educação ambiental e sustentabilidade, v. 37, Brasil.

[12] ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. (2015) – "Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: igualdade de gênero e empoderamento feminino", Assembleia Geral, tema igualdade de gênero e ODS, Nova Iorque, EUA.

	**Andria PIMENTEL** Brasileira, residente em Altamira, PA. Bacharel em Engenheira Ambiental pela Universidade do Estado do Pará (UEPA), especialista em Gestão de Programas Sociais pela Universidade Estácio de Sá, Mestre em Biodiversidade e Conversação pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Atua como Analista Socioambiental na Norte Energia S.A e acompanha os Programas e Projetos no âmbito do licenciamento ambiental da Usina Hidrelétrica Belo Monte.
	**Nubia AFRA** Brasileira, residente em Altamira, PA. Bacharel em Administração. Pós-graduada em Direito Ambiental pela Faculdade de Rondônia (FARO) e MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas. Atua como Gerente de Projetos Socioambientais na Norte Energia S.A.

	**Bruno BAHIANA** Brasileiro, residente em Altamira, PA. Bacharel em Engenheira Ambiental pela Universidade Federal Fluminense, Mestre em Biodiversidade e Conversação pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Atua como Superintendente Socioambiental na Norte Energia S.A.
	**Kesley FERREIRA** Brasileira, residente em Altamira, PA. Graduada em Licenciatura plena em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Pará (UFPA), cursando especialização em Ciências da Terra e Meio Ambiente na Universidade Federal do Pará. Atua como Analista Socioambiental no Centro Regional de Educação Ambiental do Xingu (CREAX) e acompanha os Programas de Educação Ambiental da Usina Hidrelétrica Belo Monte.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

PROPOSIÇÃO METODOLÓGICA PARA MELHORIA DO MONITORAMENTO PLUVIOMÉTRICO EM REGIÕES DE BARRAMENTO COM ESCASSEZ DE POSTOS.

Laysse Alves FERREIRA
Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental - VALE S.A.

Drica de Sousa SANTOS
Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental - UFPA

Fagner de Melo XAVIER
Mestrando em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental - UFPA

Junior Hiroyuki ISHIHARA
Doutor em Desenvolvimento Socioambiental - UFPA

RESUMO

A gestão de segurança de barragens na Amazônia Legal é severamente condicionada pela escassez de monitoramento pluviométrico, apresentando uma densidade de rede de aproximadamente 3.343,91 km² por estação, valor significativamente superior aos 575 km²/estação recomendados pela OMM. A carência de séries históricas robustas impõe incertezas críticas aos estudos hidrológicos fundamentais para a determinação da vazão de projeto e para o planejamento operacional das estruturas de barramento durante o seu ciclo de vida. Diante deste cenário, o estudo propõe uma metodologia de regionalização de chuvas fundamentada no algoritmo de Ward e na distância Euclidiana, utilizando séries de 30 anos (1986-2015) provenientes de 268 estações para identificar áreas hidrologicamente homogêneas. Foram delimitadas seis zonas distintas com acentuada heterogeneidade climática, cujas médias anuais variam de 1.133,54mm (Grupo 1) a 3.083,68mm (Grupo 6). A espacialização via Krigagem Ordinária revelou deficiências de monitoramento em bacias estratégicas, como a do Rio Xingu, que possui apenas quatro estações com séries representativas para atender a mais de 20 projetos hídricos, incluindo empreendimentos de grande porte como a UHE Belo Monte e o barramento de Pimental. A aplicação desta ferramenta é imprescindível para mitigar riscos hidrológicos e subsidiar a gestão de segurança e o planejamento de novas infraestruturas em bacias com potencial de expansão hidrelétrica e mineral na Amazônia.

ABSTRACT

Dam safety management in the Legal Amazon is severely constrained by the scarcity of rainfall monitoring, presenting a network density of approximately 3,343.91 km² per station, a value significantly higher than the 575 km²/station recommended by the WMO. The lack of robust historical series imposes critical uncertainties on hydrological studies fundamental for determining design discharge and for the operational planning of dam structures throughout their life cycle. Given this scenario, the study proposes a regionalization methodology based on Ward's

algorithm and Euclidean distance, utilizing 30-year series (1986–2015) from 268 stations to identify hydrologically homogeneous areas. Six distinct zones with marked climatic heterogeneity were defined, with annual averages ranging from 1,133.54 mm (Group 1) to 3,083.68 mm (Group 6). Spatialization via Ordinary Kriging revealed monitoring gaps in strategic basins, such as the Xingu River, which possesses only four stations with representative series to support more than 20 water projects, including large-scale enterprises like the Belo Monte Hydroelectric Power Plant and the Pimental dam. The application of this tool is essential to mitigate hydrological risks and subsidize safety management and infrastructure planning in basins with potential for hydroelectric and mineral expansion in the Amazon.

1. INTRODUÇÃO

A precipitação pluvial é a principal variável de entrada de fluxo em uma bacia hidrográfica, apresentando elevada heterogeneidade espacial e temporal, conforme destacam [1] e [2]. Em bacias com barramentos, as observações locais de longo período são cruciais para estabelecer uma gestão de riscos eficaz voltada à segurança social, ambiental, operacional e estrutural das barragens, segundo [3] e [4]. Além da segurança, estes dados fundamentam o monitoramento da sustentabilidade do potencial hidroenergético ao longo do tempo, de acordo com [5].

A Amazônia Legal é estratégica para a matriz energética nacional devido aos seus grandes "hidronegócios", como as usinas de Tucuruí, Santo Antônio, Jirau e Belo Monte, conforme [6]. Contudo, a região possui baixa densidade de monitoramento in loco, com apenas uma estação para cada 3.343,91 km², valor muito inferior ao mínimo de 575 km² recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), segundo [7]. Essa escassez resulta em incertezas severas na variabilidade climática e dificulta a modelagem de cenários de riscos ambientais e operacionais em barragens, como ressaltado por [8], [9] e [10]

Para mitigar a falta de dados, a regionalização é consolidada na literatura como a transferência de informações entre áreas hidrologicamente semelhantes. Internacionalmente, essa técnica tem sido aplicada com sucesso para prever riscos em sistemas hidrelétricos e climáticos, como demonstrado por [11] no Equador e [12] na África. Outros estudos fundamentais de regionalização incluem as pesquisas de [13] na Jordânia, [14] na Malásia, [15] na Austrália e [16] na Sérvia. No contexto do método de Ward, destacam-se ainda as aplicações de [17] na Índia e [18] na África Oriental.

A análise de agrupamento (*clustering*) é a ferramenta predominante para identificar essas zonas homogêneas, conforme [19] e [20]. O algoritmo de Ward é amplamente utilizado por sua capacidade de reconhecer padrões em conjuntos complexos de dados, permitindo a análise de áreas que possuem características físicas e estatísticas similares mesmo sem continuidade geográfica, de acordo com [21]. Na Amazônia, estudos prévios validaram que a complexidade climática regional exige a representação de, no mínimo, seis sub-regiões homogêneas para estimativas confiáveis.

Diante da necessidade de aprimorar a segurança e a gestão em áreas de barramento, este artigo propõe uma metodologia para a melhoria do monitoramento pluviométrico

na Amazônia Legal. O objetivo geral consiste em identificar zonas homogêneas de precipitação por meio de atributos estatísticos e espaciais, permitindo a regionalização de dados para subsidiar a tomada de decisões e a gestão de riscos em bacias estratégicas com monitoramento deficitário.

2. ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa concentra-se na Amazônia Legal (Figura 1), região que abriga as maiores bacias hidrográficas contíguas do mundo e detém um papel central na matriz energética nacional devido aos seus grandes projetos de "hidronegócios", como as UHEs Tucuruí, Santo Antônio, Jirau e Belo Monte. O conhecimento do comportamento pluviométrico nesta área é vital para a segurança hidrológica, pois a precipitação é o dado de entrada para todo o ciclo de vida de uma barragem, desde os estudos de viabilidade e implantação até a operação e o controle de segurança estrutural.

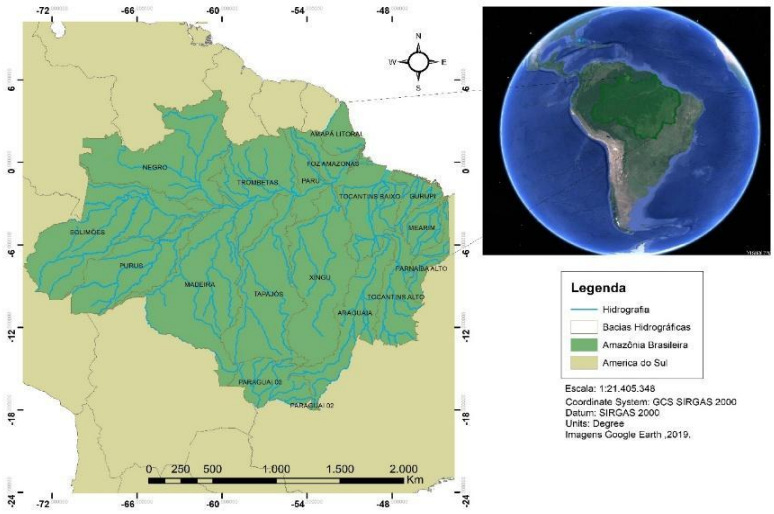


Figura 1 – Área de estudo

Os sistemas Atmosféricos atuantes na região Amazônica possuem grande relação com as moções e estiagens, sendo os principais atuantes, os mecanismos como o da Alta da Bolívia (baixa térmica na superfície), El Ninõ , Linhas de Instabilidades, Linhas de Instabilidades Brisa Fluvial ([22]; [23]; [24]; [25]).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A aplicação da regionalização segue etapas que envolvem a combinações de atributos em regiões coerentes, sendo posteriormente necessário a realização da validação da homogeneidade dos dados e das demarcações das fronteiras dos grupos formados [26]. O Fluxo metodológico, segue conforme Figura 2 é descrito logo abaixo.



Figura 2 – Fluxo metodológica da pesquisa

Fonte: Dados autoria (2022)/ confecção NotebooKLm (2026)

3.1 Dados Históricos

A série histórica de dados pluviométricos foi obtida por meio do sistema HidroWeb, sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), plataforma que integra o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Para garantir a robustez dos atributos extraídos e a confiabilidade das análises, o estudo fundamentou-se nas diretrizes da Organização Mundial de Meteorologia [27]. Para contornar baixa densidade, distribuição espacial irregular e um elevado índice de falhas (*gaps*) nos registros históricos sem comprometer o rigor científico, foram adotados os seguintes procedimentos de tratamento e seleção:

- Critério de Temporalidade: Foram selecionadas séries históricas que apresentassem, no mínimo, 20 anos de dados dentro do intervalo de 30 anos definido para o estudo (1986-2015).
- Tratamento de Dados: Utilizaram-se dados previamente tratados por [9], nos quais as lacunas foram preenchidas por meio do Método da Ponderação Regional.
- Filtro de Consistência: Estações que apresentavam falhas superior a seis meses consecutivos foram sumariamente descartadas para evitar distorções nas médias anuais.
- Amostragem Final: Após a aplicação desses filtros, de um universo inicial de 1.319 estações localizadas na Amazônia Legal, apenas 268 estações apresentaram a consistência e a continuidade necessárias para integrar o estudo.

Foram utilizados como os atributos da média da precipitação anual, média da mínima anual e média na máxima anual.

3.2 Regionalização

Aplicação dos métodos de agrupamento os dados foram agrupados pelo método de Ward, especializados pelo Método de Thiessen e posteriormente a Krinagem Ordinária.

A distância Euclidiana é definida na Equação 1 [28].

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} (X_{ki} - X_{kj})^2} \quad (1)$$

Onde : D_{ij}= Distância entre os dados observados de i e j ; X_{ki} é o valor assumido pela variável k para observação de i; X_{kj} é o valor de k para observação de j. Quanto mais próximo de zero for o valor da distância euclidiana, mais similares são os dados comparados [29].

Para a formação das zonas homogêneas, utilizou-se o método de Ward, uma abordagem popular devido à sua simplicidade de implementação e rapidez de execução [30]. Segundo [31] o método de Ward fundamenta-se que cada elemento é considerado um conglomerado único, sendo calculado a soma dos quadrados dentro de cada conglomerado, esta soma é o quadrado da distância euclidiana de cada objeto pertencente ao conglomerado em relação ao correspondente vetor de médias do conglomerado, sendo matematicamente definido como :

$$SS_i = \sum_{k=1}^{ni} (X_{ij} - \mu_i)'(X_{ij} - \mu_i) \quad (2)$$

Sendo ni o número de elementos no conglomerado Ci, quando se está no passo k do processo de agrupamento; Xij é o vetor de observações do j-ésimo elemento amostral que pertence ao i-ésimo conglomerado; μi é o centroide do conglomerado Ci e SSi representa a soma de quadrados correspondente ao conglomerado Ci . No passo k, a soma de quadrados total dentro dos grupos é definida como:

$$SSR = \sum_{i=1}^{gK} SSi \quad (3)$$

Que gk é o número de grupos existentes quando se está no passo K.

A distância entre os conglomerados Ci e Ci é definida na Equação 4

$$d(Ci, Ci) = \left[\frac{ni\, ni}{ni+ni}\right] (\mu_i - \mu_i)' (\mu_i - \mu_i)' \quad (4)$$

Em cada passo do algoritmo de agrupamento, os dois conglomerados que minimizam a distância são combinados. As comparações de conglomerados, que tem tamanhos diferentes, sofrem uma penalização representada pelo fator de ponderação $\left[\frac{ni\, ni}{ni+ni}\right]$. Quanto maiores forem os valores de $ni\ e\ ni$ é a discrepância entre eles, maior foi o valor do fator de penalização, aumentando a distância entre os centróides dos conglomerados comparados [31].

Para a espacialização foi aplicado Método de Thiessen, como uma etapa intermediária dos dados após o agrupamento hierárquico. Posteriormente foi aplicado Krigagem ordinária. O método foi selecionado como o método principal de interpolação por ser considerada a técnica que melhor representa graficamente as variáveis ambientais

[32]. Ao contrário de métodos como o IDW, a Krigagem assume que as médias locais variam e utiliza o rigor estatístico dos pontos vizinhos para a estimativa [32].

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a realização das análises de dados foi gerado histograma (Figura 3), com médias anuais. O modelo foi escolhido para a representação dos resultados devido ser um gráfico comumente utilizado pois segundo [33], possibilita uma boa representação das distribuições das frequências simples de uma variável quantitativa contínua, os quais facilitam a visualização das informações. Cabe destacar que todas as fases do trabalho foram executadas utilizando o software de SIG.

A análise exploratória dos dados iniciou-se com a elaboração do histograma das precipitações anuais médias para as 268 estações selecionadas na Amazônia Legal (Figura 3). A escolha desta representação gráfica justifica-se por sua eficácia na visualização da distribuição de frequências de variáveis quantitativas contínuas, permitindo identificar padrões centrais e dispersões de forma clara.

Os resultados demonstram que a precipitação média anual da região é de 1.838,3 mm. Observa-se que a maior densidade de dados se concentra na faixa central do gráfico, com as frequências diminuindo progressivamente em direção aos extremos — que variam de aproximadamente 713 mm a 3.183 mm/ano. Esta distribuição caracteriza uma tendência simétrica predominante, fator considerado fundamental para a integridade da pesquisa. Segundo a literatura, a ausência de distribuições multimodais ou de *outliers* severos assegura que a amostra é estatisticamente robusta e não apresenta anomalias que poderiam comprometer as análises subsequentes. Embora exista uma leve assimetria à direita após o ponto máximo, esta não é suficiente para tendenciar a distribuição geral.

A confirmação desta simetria e da consistência dos dados possui implicações diretas na metodologia adotada. Primeiramente, ela válida a aplicação do Método de Ward e da Distância Euclidiana para o agrupamento das estações, uma vez que algoritmos hierárquicos operam com maior precisão em bases de dados equilibradas. Além disso, a robustez da rede de monitoramento tratada permite que a Krigagem Ordinária (Figura 17) seja utilizada para a espacialização, assumindo que os valores em locais não medidos podem ser estimados de forma confiável a partir da estrutura de dependência espacial dos pontos vizinhos.



Figura 3 - Histograma dos dados de precipitações anuais médias

Fonte: Autoria, 2022.

A partir da análise do histograma (Figura 3), verifica-se que o valor médio dos dados, estimado em aproximadamente 1836 mm/ano.. Observa-se que a maior densidade de dados se concentra na faixa central do gráfico, com as frequências diminuindo progressivamente em direção aos extremos — que variam de aproximadamente 713 mm a 3.183 mm/ano. Esta distribuição caracteriza uma tendência simétrica predominante, fator considerado fundamental para a integridade da pesquisa. Segundo a literatura, a ausência de distribuições multimodais ou de *outliers* severos assegura que a amostra é estatisticamente robusta e não apresenta anomalias que poderiam comprometer as análises subsequentes.

Embora exista uma leve assimetria à direita após o ponto máximo, esta não é suficiente para tendenciar a distribuição geral. A confirmação desta simetria e da consistência dos dados possui implicações diretas para metodologia adotada no estudo, validando a aplicação do Método de Ward e da Distância Euclidiana para o agrupamento das estações, uma vez que algoritmos hierárquicos operam com maior precisão em bases de dados equilibradas.

Além disso, a robustez da rede de monitoramento tratada permite que a Krigagem Ordinária seja utilizada para a espacialização, assumindo que os valores em locais não medidos podem ser estimados de forma confiável a partir da estrutura de dependência espacial dos pontos vizinhos.

O Resultado da análise do agrupamento das 268 estações pluviométrica da Amazônia Legal, através do método hierárquico de Ward, utilizando como atributos a precipitação média, mínima e máxima de uma série histórica de dados de 30 anos (1986-2015) e apresentado na Figura 4 Através da análise do dendrograma (gráfico em árvore), que é formado através da matriz de similaridade dos dados, plotando uma linha de corte em seu eixo y (valor dado partir da distância euclidiana), determinou-se à distância de corte formando seis grupos, conforme Figura 4.

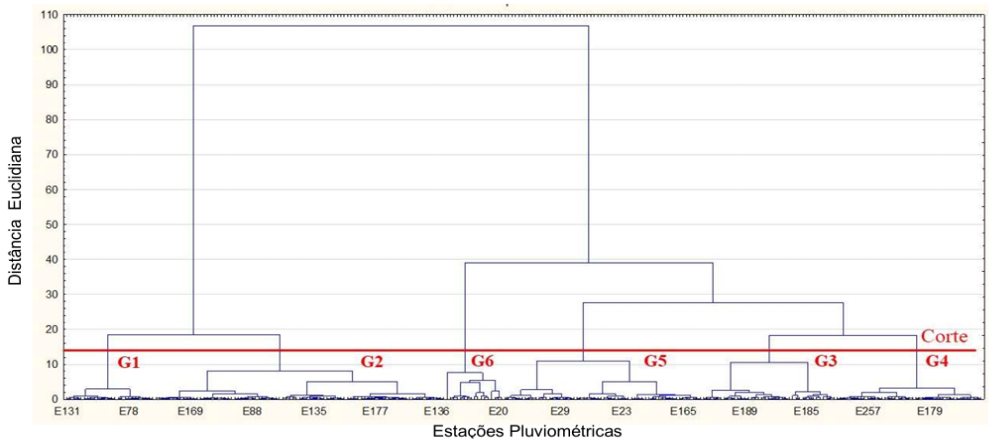


Figura 4 - Dendrograma para 268 Estações Pluviométricas de Estudo.

Fonte: Autoria, 2022.

A identificação das seis regiões homogêneas não se caracteriza como arbitrária; ao contrário, corrobora os resultados obtidos em estudos anteriores. Pesquisas conduzidas por [34], [20] e [9], que analisaram os sistemas atmosféricos responsáveis pela variabilidade das chuvas na Amazônia por meio de técnicas de análise de agrupamento, indicam que, para a adequada caracterização da variabilidade pluviométrica da bacia amazônica, é necessária a definição de, no mínimo, seis sub-regiões distintas.

A Figura 5 – Mapa de Agrupamentos das estações, demonstra de forma especializada. Um aspecto relevante a ser destacado é que, apesar de as análises serem realizadas sobre áreas e conjuntos de dados semelhantes, os estudos anteriores não utilizaram necessariamente as mesmas metodologias e atributos, onde grande parte utilizou variáveis de natureza geográfica.

Tais atributos não foram incorporados na presente pesquisa, uma vez que está se fundamenta na hipótese de que a identificação de regiões hidrologicamente similares não está necessariamente associada à continuidade espacial do ponto de vista geográfico

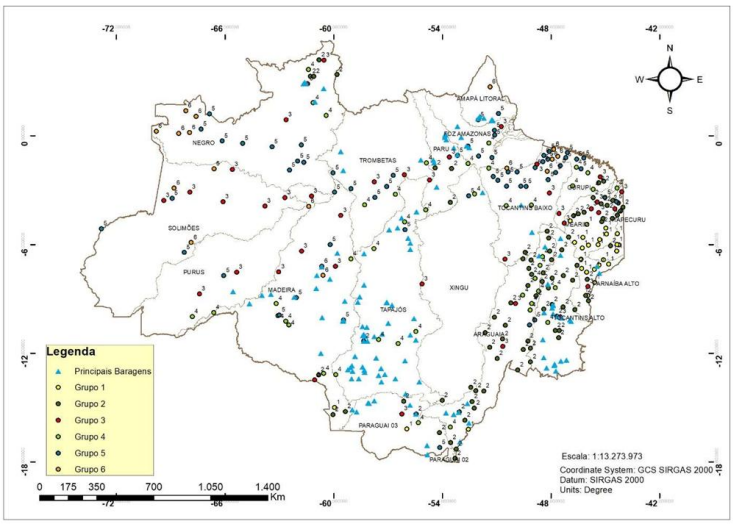


Figura 5 - Agrupamento das Estações Pluviométricas

Fonte: Autoria,2022.

Analisando as médias de precipitações anuais (Figura 6), mínima (Figura 7) e máxima (Figura 08) dos grupos, o Grupo 1 é o que apresenta a menor média pluviométrica anual (1133,54 mm/ano), o mesmo se encontra de forma homogênea no Maranhão (região de transição de biomas cerrado), e algumas estações de forma espaçadas no Mato Grosso (bioma cerrado), estando inserido nas bacias do Rio Mearim, Bacia Rio Itapecuru e bacia do Alto Parnaíba.

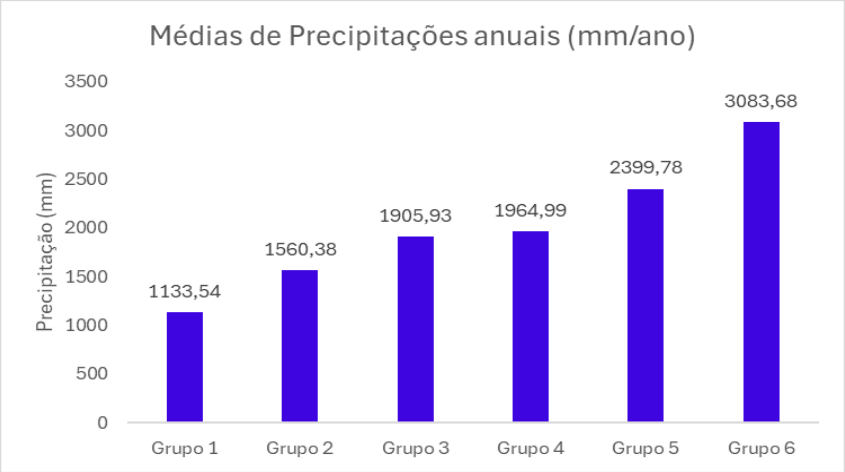


Figura 6 – Média de precipitação anual. Fonte: Autoria,2022.

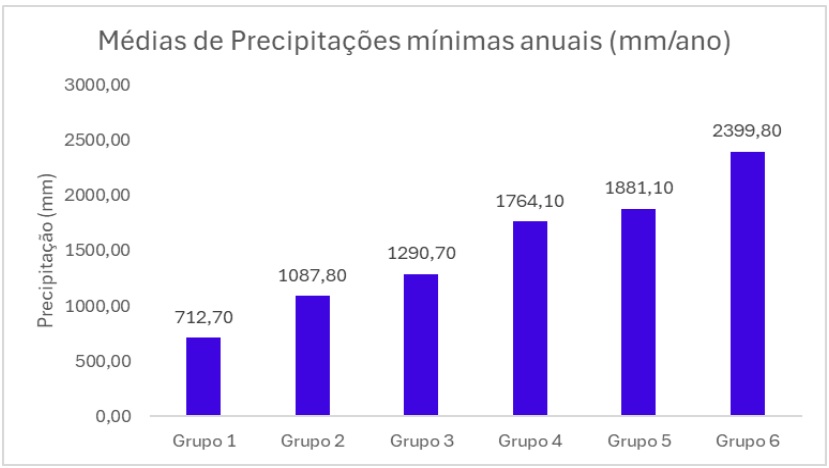


Figura 7 – Média de precipitação mínimas anuais. Fonte: Autoria,2022.

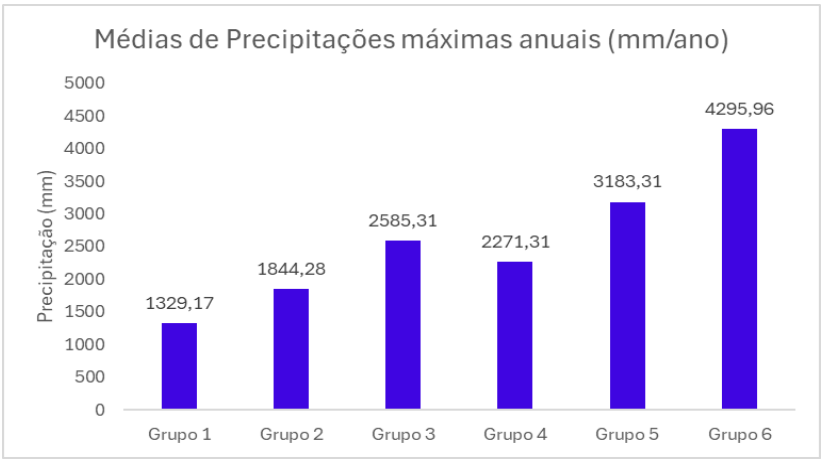


Figura 8 – Média de precipitação máximas anuais. Fonte: Autoria,2022.

Embora a presente pesquisa tenha empregado exclusivamente dados de precipitação como atributo para a análise de agrupamento, observa-se que o Grupo 1 apresenta elevada correspondência espacial com a classe climática Aw da classificação de Koppen refinada por [35] (Figura 9). Essa convergência é tecnicamente consistente, uma vez que o clima do tipo Savana é caracterizado por menores volumes anuais de precipitação e pela presença de estação seca definida. Assim, mesmo baseadas em conjuntos distintos de variáveis e metodologias, ambas as abordagens capturam um mesmo padrão climático dominante associado à variabilidade pluviométrica regional.

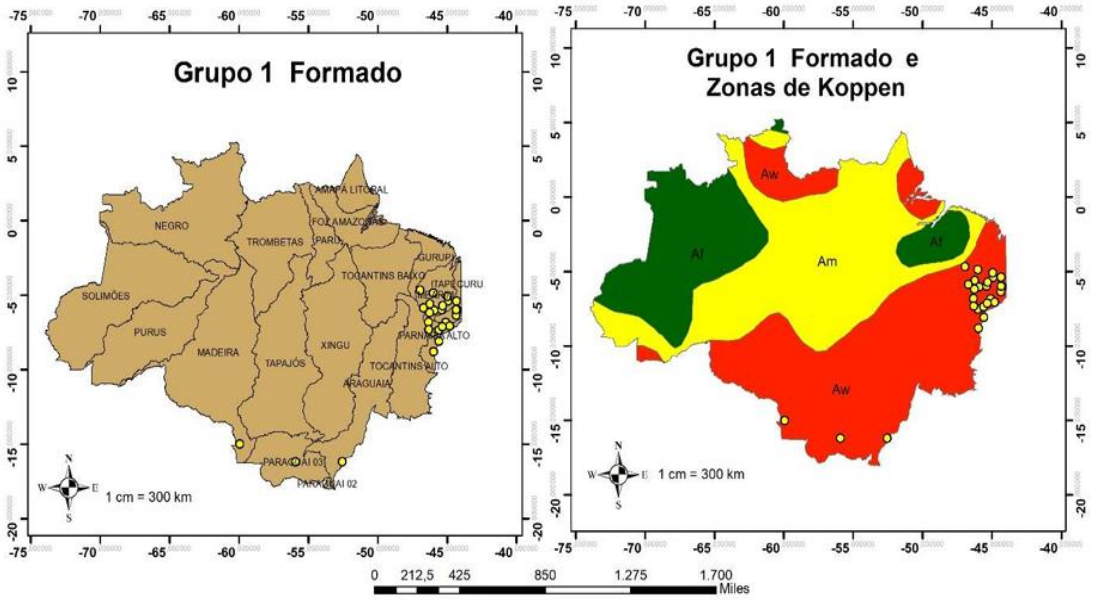


Figura 9 - Grupo 1 e sua similaridade com a Classificação de Koppen.

Fonte: Autoria, 2022 e [35]

O grupo 2 apresenta a média de precipitação anual de 1560,38 mm/ano, mínima de 1087,8 e máxima de 1844,28 mm, demonstrando padrões semelhantes ao Grupo 1, porém, mais especializado, também estando presente em áreas de savanas, no entanto, observa-se alta espacialidade, estando presente desde a região sul, norte e central amazônica. Esse comportamento induz a percepção de áreas hidrologicamente similares que não necessariamente estão contínuas geograficamente.

A percepção dessas áreas pode ter sido favorecida devido ao uso de atributos no agrupamento, de dados que não possuem dependência espacial (coordenadas geográficas). Outro fator a ser destacado do grupo 2 é a presença deste grupo nas montantes das bacias hidrográficas de alto potencial hídrico da Amazônia, como das cabeceiras das Bacias hidrográficas do Rio Araguaia, Bacia do Rio Xingu, Bacia do Rio Madeira, Bacia do Rio Negro e Bacia do Rio Paru, conforme Figura 10.

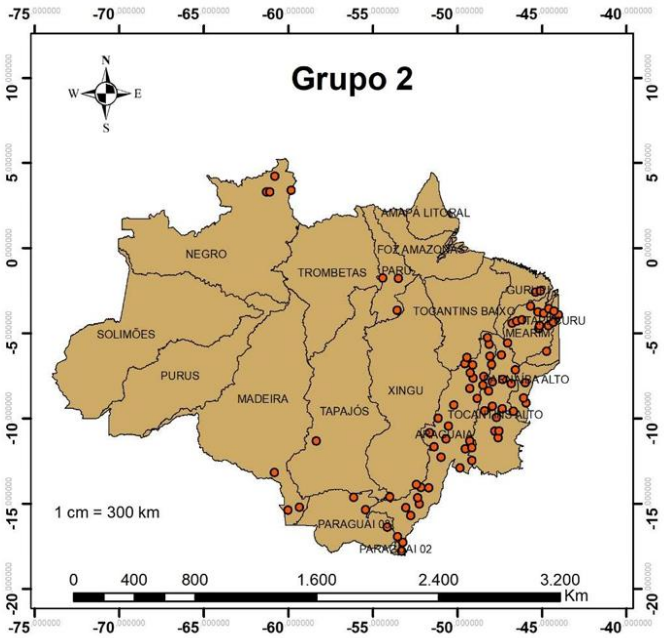


Figura 10 - Distribuição geográfica das estações do Grupo 2. Fonte: Autoria, 2022.

Considerando a influência da vegetação sobre a precipitação, conforme discutido por [36], observa-se que a distribuição espacial do Grupo 2 pode estar associada ao arco do desmatamento, padrão também identificado por [20]. Essa faixa estende-se do Maranhão até Rondônia, abrangendo o leste do Pará e os estados do Tocantins e Mato Grosso. A disposição espacial fragmentada e não centralizada do Grupo 2 é coerente com a dinâmica heterogênea do desmatamento na Amazônia, sugerindo a atuação de fatores antrópicos na variabilidade pluviométrica regional.

O Grupo 3 possui média anual de precipitação de 1905,93 mm, mínima de 1290,70 mm e máxima de 2585,31, abrangendo todas as bacias hidrográficas da região amazônica, exceto a Bacia do Amapá Litoral. A espacialidade do grupo 3 converge com os ventos alísios do Norte sobre o nordeste da Amazônia, conforme explicitado por [37]. O grupo é explicitado na Figura 11.

Nota-se que apesar de possuir média anual e mínima anual de precipitação menor que a do Grupo 4, quando se trata de precipitação máxima o grupo 3 possui maior volumetria de precipitação que a do grupo 4. Sugerindo probabilidade de eventos de chuvas intensas (extremas) em um curto período.

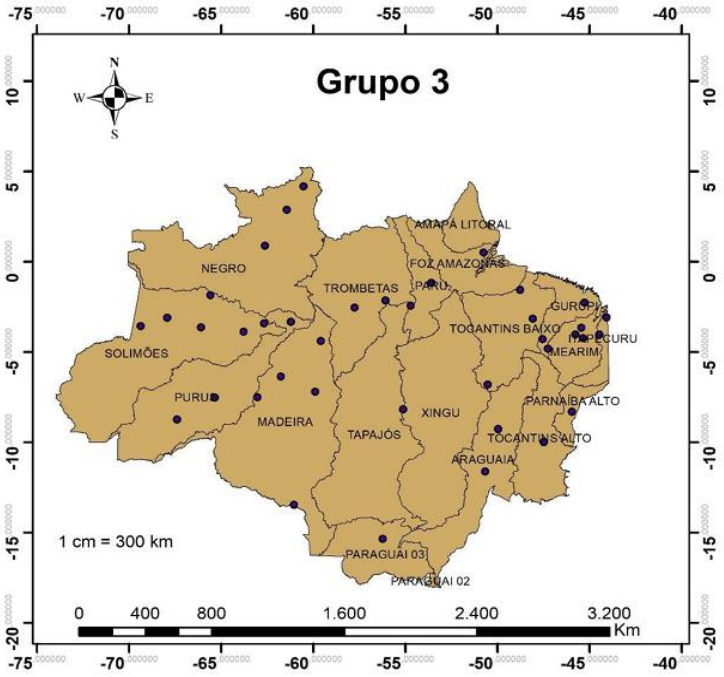


Figura 11 - Distribuição geográfica das estações do Grupo 3. Fonte: Autoria, 2022.

O Grupo 4 se assimila ao grupo 3 em sua espacialidade, tendo uma precipitação média um tanto maior, sendo 1964,99 mm/ano. A precipitação mínima foi de 1764,10. No entanto, o grupo 4 possui uma precipitação máxima (2271,31 mm) menor que a do Grupo 3. O grupo se concentra nas partes médias e baixas topograficamente das bacias do Rio Madeira, Bacia do Rio Tapajós, Bacia do Rio Xingu, Bacia do rio Araguaia, Bacia do rio Tocantins, bacia do Rio Gurupi e Foz do Rio Amazonas, conforme demostrando na Figura 12.

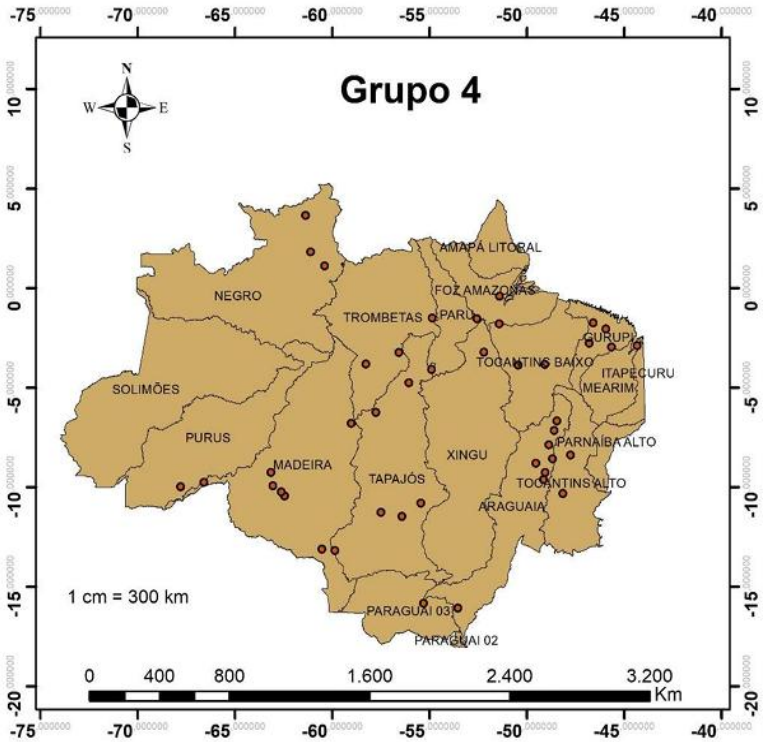


Figura 12 - Distribuição geográfica das estações do Grupo 4. Fonte: Autoria, 2022.

Observa-se que a maioria das estações associadas ao Grupo 5 (Figura 13), está localizada em trechos de jusante de bacias hidrográficas com elevado potencial para uso hidrelétrico e mineral. Destacam-se, nesse contexto, o baixo curso do rio Tocantins, correspondente ao último degrau hidráulico da bacia, aproveitado para geração de energia por meio da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, e a bacia do rio Trombetas, amplamente associada à atividade mineral.

Sob a ótica climática, o Grupo 5 localiza-se predominantemente na zona costeira, região caracterizada por elevados volumes de precipitação associados à atuação de sistemas atmosféricos costeiros. O grupo apresenta precipitação média anual de aproximadamente 2399,78 mm, com média das precipitações mínimas anuais de 1881,1 mm e média das máximas anuais de 3183,31 mm.

A distribuição espacial das estações encontra-se majoritariamente inserida nos limites da classe climática Af da classificação de Köppen, conforme refinada por [35], caracterizada por elevados índices pluviométricos e baixa variabilidade sazonal ao longo do ano. A Figura 13 apresenta a distribuição espacial das estações pertencentes ao Grupo 5.

Adicionalmente, admite-se a possibilidade de que o regime pluviométrico do Grupo 5 seja influenciado pela atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), sistema responsável pela convergência de fluxos de umidade associados a ventos de sul para norte, favorecendo a ocorrência de convecção intensa e eventos de precipitação extrema na bacia amazônica [38].

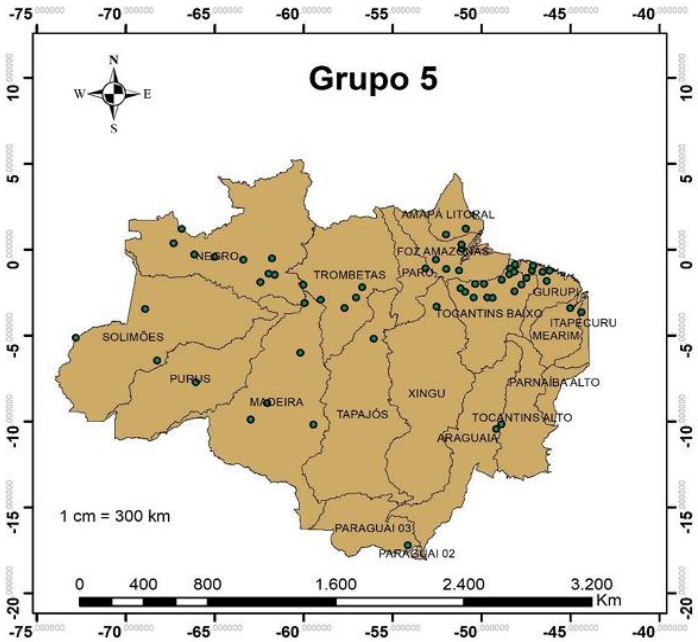


Figura 13 - Distribuição geográfica das estações do Grupo 5. Fonte: Autoria, 2022.

Por fim, o Grupo 6 se constitui como o mais chuvoso (3083,68 mm/ano), possuindo a precipitação mínima de 2399,8 mm maior que as máximas anuais dos grupos 1 , grupo 2 e grupo 4. A precipitação anual máxima do grupo 6 gira em torno de 4295,96mm, um índice de precipitação alto. Tal fator pode ser explicado pela localização parte em áreas costeiras e parte no noroeste do Amazonas (local denominado Cabeça do Cachorro).

Através de análise de agrupamento e dos dados levantados na pesquisa, foi identificado que apesar de grandes projetos de aproveitamento hídrico para geração de energia, tem baixa densidade e espacialidades de pluviômetros. A Tabela 1 mostra as Bacias nível 1 (de acordo com a Agência Nacional de Águas), os projetos de aproveitamento hídricos para geração de energia (UHE, PCH e UGH), e em contraste o número de estações com séries históricos possíveis de serem ter uma análise de tendência de precipitação.

Tabela 1 – Bacias da Amazônia Legal, projetos de aproveitamento hídrico instalados e rede de monitoramento de chuvas (pluviômetros)

Bacia	**UHE / PCH / CGH**	**Nº de Estações**
Solimões	0	11
Purus	6	6
Madeira	91	24
Tapajós	187	9
Xingu	20	4
Araguaia	60	42
Alto Tocantins	87	20
Baixo Tocantins	3	26
Merim	6	27
Gurupi	0	15
Foz Amazonas	4	9
Amapá Litoral	20	3
Paru	6	6
Trombetas	8	10
Negro	6	24
Alto Paranaíba	14	11
Itapecuru	4	14
Paraguai	130	7
TOTAL	**652**	**268**

Fonte: Autoria,2022.

Para a espacialização dos dados, utilizou-se do método de Krigagem Ordinária, este método é considerando um dos mais eficientes de estimativa linear, utilizando à média ponderada ([39]; [40]). Gerou-se o variograma dos dados, conforme Figura 14.

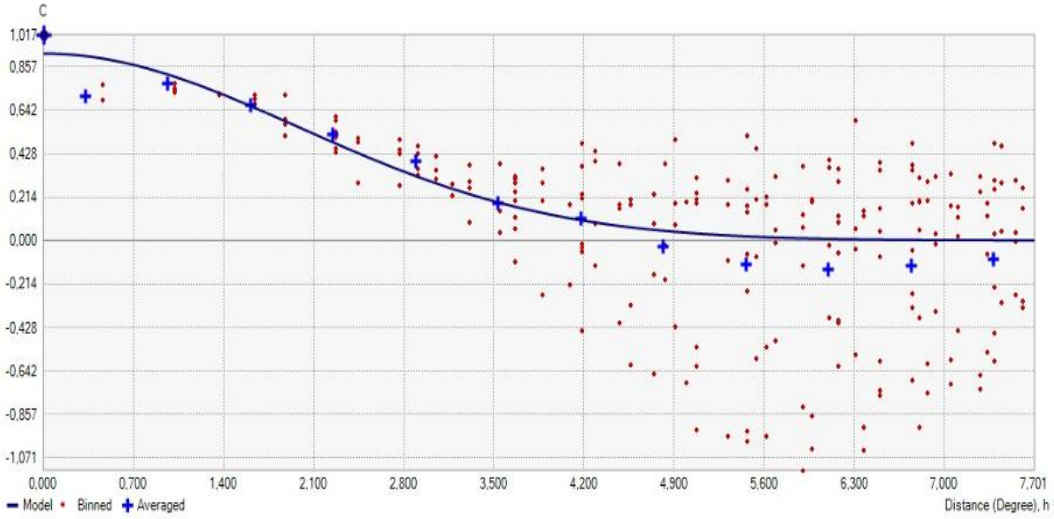


Figura 14 - Variograma dos Dados Interpolados

Fonte: Autoria, 2022.

A partir da espacialização dos resultados (Figura 15), torna-se possível identificar zonas pluviometricamente homogêneas que não eram evidentes antes da aplicação da análise de agrupamento. Observa-se, por exemplo, que a bacia do rio Xingu apresenta diferenciação espacial significativa ao longo de seu eixo longitudinal: o setor de montante insere-se em um grupo com médias anuais de precipitação variando entre 1622,51 e 1898,36 mm/ano, enquanto os trechos de jusante se associam a grupos caracterizados por totais pluviométricos anuais mais elevados.

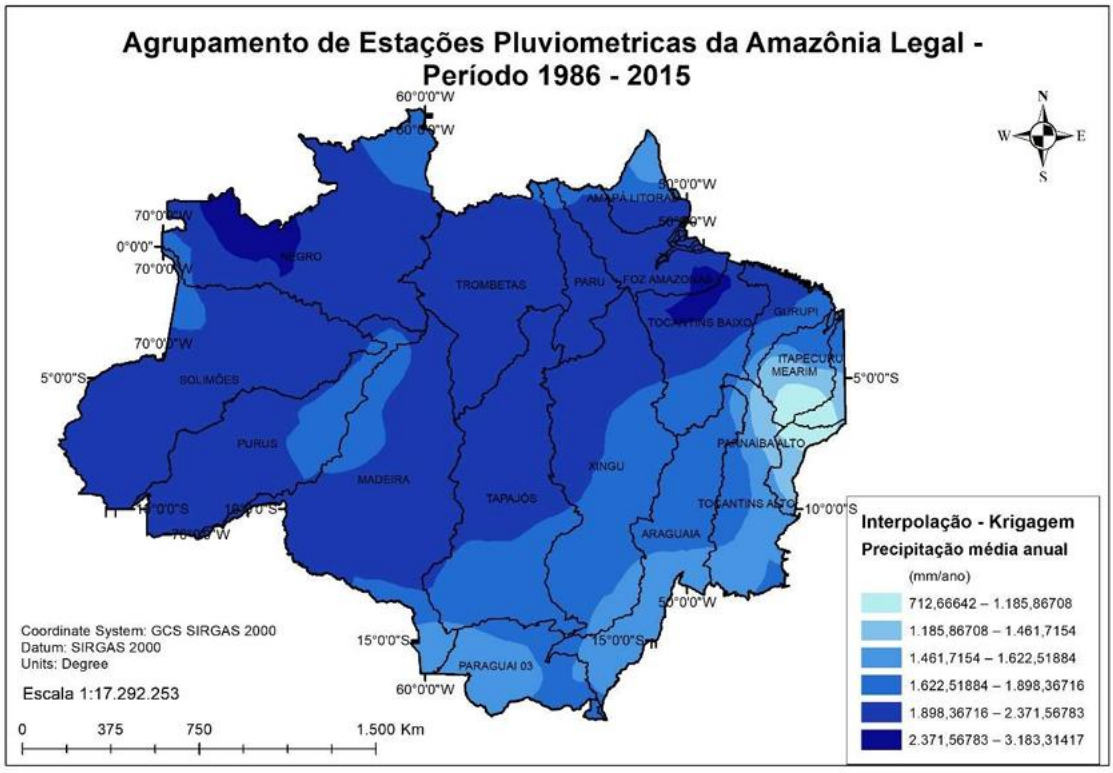


Figura 15 - Mapa de isoietas da precipitação média anual após agrupamento.

Fonte: Autoria, 2022.

As bacias localizadas em bioma de Savana, apresentam índices pluviométricos menores, enquanto as regiões costeiras apresentaram maiores índices conforme já discutido. A espacialização de bacias com extremos de baixo monitoramento (como a Bacia do Rio Xingu), apresentou três comportamentos hidrológicos, sendo sua jusante com maior índice de precipitação. A heterogeneidade da bacia, demonstra a necessidade de ajustes da gestão hídrica de acordo com suas características de precipitação, etapa de entrada de fluxo na bacia que influência diretamente a vazão utilizando a jusante para geração de energia nas Barragens de Belo Monte e Pimental.

CONCLUSÃO

A presente pesquisa confirmou que a regionalização pluviométrica, aliada a técnicas de análise multivariada e interpolação espacial, constitui uma ferramenta eficaz para mitigar a escassez de dados hidrometeorológicos na Amazônia Legal, uma das principais limitações para estudos hidrológicos aplicados a barragens.

A partir da análise de uma série histórica de 30 anos (1986–2015), composta por dados de 268 estações pluviométricas, foi possível identificar precipitações médias de 1185,66 mm/ano enquanto em regiões como noroeste Amazônico possui precipitações médias de 3183,31 mm/ano, com distribuição aproximadamente simétrica e elevada variabilidade espacial. A aplicação do método de Ward permitiu a definição de seis regiões hidrologicamente homogêneas, resultado consistente com a literatura e representativo da complexidade climática da região amazônica, onde os valores anuais variam significativamente entre diferentes áreas.

A utilização da krigagem ordinária possibilitou a espacialização dos dados e a estimativa em áreas não monitoradas, demonstrando capacidade de reduzir lacunas associadas à baixa densidade de estações.

Nesse contexto, destaca-se a aplicabilidade da metodologia em bacias estratégicas como a do Rio Xingu, que, apesar de apresentar reduzida densidade de monitoramento pluviométrico frente à sua relevância para o setor hidrelétrico, pôde ter seus padrões hidrológicos representados de forma consistente por meio da regionalização. Tal abordagem permite subsidiar estudos hidrológicos mais robustos em escala de bacia, ampliando a confiabilidade das estimativas mesmo em cenários de limitação de dados.

Do ponto de vista aplicado, os resultados obtidos contribuem diretamente para a gestão de barragens, ao fornecer subsídios para estimativas mais consistentes de eventos extremos, modelagem hidrológica, definição de vazões de projeto e suporte à tomada de decisão em cenários de risco. Em um contexto de mudanças climáticas e intensificação de eventos extremos, o uso de metodologias que aumentem a confiabilidade dos dados hidrológicos torna-se ainda mais relevante para a segurança operacional e ambiental de barramentos.

Por fim, ressalta-se que a metodologia proposta não substitui a necessidade de ampliação da rede de monitoramento, mas se apresenta como uma solução complementar, capaz de reduzir incertezas e aumentar a robustez dos estudos em regiões com escassez de dados. Dessa forma, o trabalho contribui tanto para o avanço

da regionalização hidrológica na Amazônia quanto para sua aplicação prática na engenharia de barragens.

Recomenda-se como continuidade do estudo, a análise das precipitações extremas, principalmente em áreas que não apresentam maiores médias de precipitação anuais (como o Grupo 3), mas apresentam máximas anuais, sugerindo eventos de chuvas extremas.

5. PALAVRAS-CHAVE

Regionalização de Chuvas; Amazônia; Barragens hidrelétricas; Aproveitamento energético; Algoritmo de Ward.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] TUCCI, C. E. M. (2009) – "Hidrologia: Ciência e Aplicação", Editora da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil.

[2] CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. (1988) – "Applied Hydrology", McGraw-Hill, New York, Estados Unidos.

[3] TORIDE, K. et Al. (2018) – "Long-term trend analysis on total and extreme precipitation over Shasta Dam watershed", Science of the Total Environment, v. 626, p. 244- 254.

[4] BERTINI, C.; et Al. (2020) – "On the Use of Satellite Rainfall Data to Design a Dam in an Ungauged Site", Water, v. 12, Estados Unidos.

[5] GUIAMEL, I. A.; LEE, H. S. (2020) – "Potential Hydropower Estimation for the Mindanao River Basin in the Philippines Based on Watershed Modelling Using the Soil and Water Assessment Tool", Energy Reports, v. 6, Holanda.

[6] BATISTA, I. M. S.; MIRANDA, L. M. (2019) – "Os "Hidronegócios" nos rios da Amazônia", Revista Brasileira de História, v. 39, n. 81, p. 117-139.

[7] ISHIHARA, J. H. et Al. (2014) – "Avaliação quantitativa e espacial da precipitação na Amazônia Legal (1978 a 2007)", Revista Brasileira de Recursos Hídricos , v. 19, n. 1, pág. 29-39.

[8] NOBRE, C. A.; OBREGÓN, G. O.; MARENGO, J. A.; FU, R.; POVEDA, G. (2009) – "Characteristics of Amazonian Climate: Main Features", Amazonia and Global Change, Springer, Alemanha.

[9] PESSOA, F. C. L.; BLANCO, C. J. C.; GOMES, E. P. (2018) – "Delineamento de regiões homogêneas para escoamento via fuzzy c-means na Amazônia", Water Practice & Technology , v. 13, n. 1, pág. 210-218.

[10] FERREIRA F., D. F.; PESSOA, F. C. L. (2022) – "Identification of Homogeneous Regions Based on Rainfall in the Amazon River Basin", International Journal of Climatology, v. 42, Reino Unido.

[11] HASAN, M. M.; WYSEURE, G. (2018) – "Impact of Climate Change on Hydropower Generation in the Jubones River Basin Using SWAT Model", Water, v. 10, Suíça.

[12] CONWAY, D.; et Al. (2017) – “Hydropower Plans in Eastern and Southern Africa Increase Risk of Concurrent Climate-Related Electricity Supply Disruption”, Nature Energy, v. 2, Reino Unido.

[13] AL-QADAMI, A.; ABDULLA, F. A. (2018) – “Regionalização da Precipitação na Jordânia”, Conferência do Arabian Journal of Geosciences, Springer, Cham, p. 115-118.

[14] ARIFF, N. M.; JEMAIN, A. A.; BAKAR, M. A. A (2016) – “Regionalization of IDF curves with L-moments for storm events”, Int. J. Math. Comput. Sci, v. 10, n. 5, p. 217-223.

[15] CHIN, H. Y. (2020) – “Regionalization of Annual Maximum Rainfall in Australia Using Cluster Analysis”, Hydrological Sciences Journal, v. 65, Reino Unido.

[16] GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. (2014) – “Spatiotemporal Characteristics of Drought in Serbia”, Journal of Hydrology, v. 510, Holanda.

[17] AH, S. S.; THOMAS, R. (2016) – “Regionalização das chuvas no estado de Kerala”, Procedia Technology, v. 24, p. 15-22.

[18] SATTI, S. et al. (2017) – “Aprimorando previsões sazonais dinâmicas por meio da regionalização objetiva”, Journal of Applied Meteorology and Climatology , v. 56, n. 5, p. 1431-1442.

[19] BAKAR, M. A. A. et al. (2020) – “Cluster Analysis of Hourly Rainfalls Using Storm Indices in Peninsular Malaysia”, Journal of Hydrologic Engineering, v. 25, n. 7, p. 05020011.

[20] SANTOS, E. B. et al. (2015) – “Regionalização da precipitação da Amazônia brasileira”, Atmospheric Science Letters , v. 16, n. 3, p. 185-192.

[21] AHUJA, S.; DHANYA, C. T. (2012) – “Regionalization of Rainfall Using RCDA Cluster Ensemble Algorithm in India”, Journal of Software Engineering and Applications, V. 5 N. 8, p. 568-573.

[22] MOLION, L.C.B., et al. (1987) “Influência da circulação atmosférica do Hemisfério Norte na precipitação pluviométrica da Amazônia: um estudo de caso”, Anais do VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Salvador, BA.

[23] FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. (1998) – “Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia”, Acta amazônica, v. 28, n. 2, p. 101-101.

[24] CUTRIM, E. M. C.; et al. (2000) – “Chuvas na Amazônia durante o século XX”, Anais do XI CBMET, XI Congresso Brasileiro De Meteorologia, p. 1327-1333, Rio de Janeiro, RJ.

[25] ESPINOZA, J. C. et al. (2019) – Climate Dynamics, v. 52, n. 9-10, p. 5413-5430.

[26] IRWIN, S. et al. (2017) – “Delineation of precipitation regions using location and atmospheric variables in two Canadian climate regions: the role of attribute selection”, Hydrological Sciences Journal, v. 62, n. 2, p. 191-204.

[27] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. (1984) – “Guide to Climatological Practices”, World Meteorological Organization, Genebra, Suíça.

[28] LIRA, B. R. P. et al. (2019) – “Avaliação do comportamento e da tendência pluviométrica na Amazônia Legal no Período de 1986 a 2015”.

[29] HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. (2009) – “Análise Multivariada de Dados”, Bookman, Porto Alegre, Brasil.

[30] KAJEWSKA, K.; SZKUDLAREK, B. (2020) – “Application of Cluster Analysis Methods in Classification Studies”, Information Systems in Management, v. 9, Polônia.

[31] MURTAGH, F.; LEGENDRE, P. (2014) – “Ward’s Hierarchical Agglomerative Clustering Method: Which Algorithms Implement Ward’s Criterion?”, Journal of Classification, v. 31, Estados Unidos.

[32] LI, J.; HEAP, A. D. (2014) – “A Review of Comparative Studies of Spatial Interpolation Methods in Environmental Sciences: Performance and Impact Factors”, Ecological Informatics, v. 6, Holanda.

[33] BATISTA, P. da S. (2019) – “Validação dos dados de precipitação pluvial do produto Merge para a Amazônia Central”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Oeste do Pará.

[34] Delahaye, F.; Kirstetter, P.E.; Dubreuil, V.; Machado, L.A.T.; Vila, D.A.; Clark, R (2015) – “A consistent gauge database for daily rainfall analysis over the Legal Brazilian Amazon”, Journal of Hydrology, 527:292–304.

[35] Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. (2015) – “Köppen’s climate classification map for Brazil”, Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728.

[36] DURIEUX, L.; MACHADO, L. A. T.; LAURENT, H. (2003) – “The Impact of Deforestation on Cloud Cover Over the Amazon Arc of Deforestation”, Remote Sensing of Environment, v. 86, Estados Unidos.

[37] ESPINOZA, J. C. et al. (2012) – “Padrões de circulação em larga escala e chuvas relacionadas na Bacia Amazônica: uma abordagem de redes neuronais”, Dinâmica climática, v. 38, n. 1, pág. 121-140.

[38] VIEIRA, S. O. (2013) – “Efeitos da zona de convergência do atlântico sul (zcas) sobre as chuvas na região sul da Amazônia brasileira”.

[39] ADHIKARY, S. K. et al. (2016) – “Genetic programming-based ordinary kriging for spatial interpolation of rainfall”, Journal of Hydrologic Engineering, v. 21, n. 2, p. 04015062.

[40] GUPTA, A.; KAMBLE, T.; MACHIWAL, D. (2017) – “Comparison of ordinary and Bayesian kriging techniques in depicting rainfall variability in arid and semi-arid regions of north-west India”, Environmental Earth Sciences, v. 76, n. 15, p. 1-16.



Laysse Alves FERREIRA

Engenheira Sanitária e Ambiental, mestre em Engenharia de Barragens com ênfase em Gestão Ambiental. Atua na área de recursos hídricos e gestão de dados ambientais, com experiência em empreendimentos de infraestrutura, como linhas de transmissão na Amazônia e parque solar no Cerrado. Atualmente trabalha na gestão de recursos hídricos em projetos minerários com interfaces em barragens.



Fagner de Melo XAVIER

Graduado em Engenharia de Pesca e mestrando em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental pela UFPA. Possui experiência em Recursos Pesqueiros e estudos socioambientais relacionados à atividade pesqueira. Participou do artigo “Nascer, viver, pescar e morrer: o paradoxo da coragem na pesca no pé da barragem na UHE Tucuruí-PA” e do e-book “A pesca na área de influência da UHE de Tucuruí”.



Drica de Sousa SANTOS

Técnica em Meio Ambiente pelo IFPA e graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFPA. Integra o programa Meninas e Mulheres nas Engenharias (PMME) e atua como diretora administrativo-financeira da Empresa Júnior Esquadro Projetos e Consultoria. Bolsista de iniciação científica (PIBIC), com interesse em gestão de projetos, inovação e desenvolvimento socioambiental.



Junior Hiroyuki ISHIHARA

Possui graduação em Engenharia Sanitária, mestrado em Engenharia Civil na área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Doutorado em Desenvolvimento Socioambiental. Docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental. Possui expertise na área de Saneamento, Recursos hídricos, hidrologia e gestão ambiental de barragens.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3 - ASPECTOS E PRÁTICAS AMBIENTAIS NO PROJETO, CONSTRUÇÃO, OPERAÇÃO E DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS E TSFS.
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

RECUPERAÇÃO DE ENCOSTAS E REABILITAÇÃO ECOLÓGICA NO ÂMBITO DO PRAD DA UHE BELO MONTE

Joyce PINHEIRO DE OLIVEIRA FIORI
Geóloga - Ambiental Tecnologia Consultoria e Monitoramentos

Leandro VIEIRA SANTOS KROGER
Analista Socioambiental Sênior - Norte Energia S.A.

Roberto LEANDRO DA SILVA
Gerente de Meios Físico e Biótico - Norte Energia S.A.

Bruno GONÇALVES BAHIANA
Superintendente Socioambiental e do Componente Indígena - Norte Energia S.A.

José Maria MARTINS DO NASCIMENTO JÚNIOR
Especialista Socioambiental - Norte Energia S.A.

RESUMO

O Programa de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) da UHE Belo Monte foi concebido para recompor a paisagem das áreas afetadas pelas obras civis e restabelecer suas funções ecológicas. Entre 2012/2013 e 2019/2020, foram recuperados 1.607,38 hectares por meio de ações integradas de produção de mudas, conformação do terreno, implantação de sistemas de drenagem, revegetação e manutenção. A estratégia de revegetação priorizou espécies nativas do bioma Amazônico, incluindo táxons ameaçados de extinção, e utilizou mix de herbáceas para rápida cobertura do solo, alcançando índices de recobrimento do solo por espécies herbáceassuperiores a 96%. O monitoramento registrou aumento da serapilheira, incremento da regeneração natural e retorno da fauna silvestre, evidenciando a evolução da resiliência ecológica. A integração com o Programa de Monitoramento da Estabilidade das Encostas Marginais (PBA 10.3) permitiu avaliar a estabilidade geotécnica das áreas revegetadas e orientar intervenções corretivas, consolidando a sinergia entre recuperação ambiental e segurança das estruturas marginais da UHE Belo Monte.**Erro! Indicador não definido.**

ABSTRACT

The Degraded Areas Recovery Program (PRAD) of the Belo Monte Hydropower Plant was designed to restore the landscape and reestablish ecological functions in areas affected by civil works. Between 2012/2013 and 2019/2020, a total of 1,607.38 hectares were rehabilitated through seedling production, terrain reshaping, drainage systems installation, revegetation, and maintenance. The revegetation strategy prioritized native Amazonian species, including threatened taxa, and applied herbaceous seed mixes to promote rapid soil cover, resulting in herbaceous ground cover rates exceeding 96%. Monitoring results indicate increased litter layer, natural regeneration, and wildlife return, demonstrating ecological resilience. Integration with the Marginal Slopes Stability Monitoring Program (PBA 10.3) enabled assessment of geotechnical stability and guided corrective actions, reinforcing the synergy between ecological restoration and structural safety at Belo Monte.

1. INTRODUÇÃO

O Programa de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) da UHE Belo Monte foi estruturado para mitigar os impactos decorrentes da implantação das obras civis, restabelecendo a estabilidade física e a funcionalidade ecológica das áreas afetadas que foram desocupadas após as intervenções. As ações contemplam desde a produção de mudas nativas até a implantação de sistemas de drenagem, plantio de espécies arbóreas e herbáceas, manutenção e monitoramento contínuo.

Entre 2012 e 2020, o PRAD evoluiu metodologicamente, incorporando recomendações do órgão ambiental, como o uso de arranjos em quincôncio (1.666 mudas/ha), priorização de espécies nativas e inclusão de táxons ameaçados. Paralelamente, o Programa de Monitoramento da Estabilidade das Encostas Marginais (PBA 10.3) forneceu suporte técnico essencial, permitindo avaliar a evolução geotécnica das áreas revegetadas e identificar trechos suscetíveis a instabilidades.

A integração entre PRAD e PBA 10.3 demonstra que a recuperação ecológica e a estabilidade geotécnica são processos interdependentes, especialmente em ambientes sujeitos à hidrodinâmica de reservatórios, como os reservatórios Xingu e Intermediário.

2. METODOLOGIA

2.1 Produção de mudas e revegetação

As mudas utilizadas foram produzidas no viveiro florestal do Sítio Belo Monte, totalizando 1.723.660 unidades até 2020 **[1]**. As espécies contemplam diferentes grupos sucessionais, incluindo pioneiras, secundárias e clímax, além de espécies ameaçadas como *Cedrela odorata* e *Swietenia macrophylla*. A revegetação foi realizada por dois métodos principais: plantio arbóreo em quincôncio (1.666 mudas/ha) e plantio herbáceo manual ou por hidrossemeadura, com mix contendo *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea*, *Stylosanthes sp.*, entre outras.

Tabela 1 – Produção de Mudas, por ano agrícola, nos Viveiros Florestais do PRAD.

MÊS	ANO AGRÍCOLA								
	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020
Julho	595*	-	5.230	41.113	8.879	5.703	-	83.361	35.155
Agosto	-	-	1.811	17.308	10.020	3.506	35.185	82.070	74.016
Setembro	-	-	25.354	13.987	28.823	2.540	62.825	106.058	34.448
Outubro	-	1.684	31.518	19.075	46.842	7.636	83.162	116.034	7.709
Novembro	-	-	8.910	14.391	19.193	5.431	6.202	19.158	-
Dezembro	-	-	37.763	6.136	31.354	7.740	54.810	-	-
Janeiro	-	-	34.759	11.496	20.128	6.479	21.821	-	-
Fevereiro	-	-	15.719	6.947	26.842	2.458	13.722	-	-

MÊS	ANO AGRÍCOLA								
	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020
Março	-	-	64.639	7.880	23.829	2.964	-	-	-
Abril	-	-	67.478	5.259	14.587	3.110	11.298	-	-
Maio	-	7.684	38.327	4.453	2.386	3.450	5.185	13.325	-
Junho	-	-	40.482	6.161	4.318	-	20.772	13.562	-
Total	**595**	**9.368**	**371.990**	**154.206**	**237.201**	**51.017**	**314.982**	**433.568**	**151.328**

Notas * Mudas adquiridas em viveiros florestais localizados no entorno do empreendimento.
Fonte: CCBM (2020).

2.2 Conformação e drenagem

As atividades de conformação e implantação dos sistemas de drenagem buscaram conduzir o fluxo das precipitações pluviais sobre as áreas degradadas, de modo a reduzir a ocorrência de processos erosivos e reduzir ao máximo o carreamento de sedimentos para áreas lindeiras não impactadas.

A estabilização física das áreas incluiu descompactação do solo, implantação de canaletas, curvas de nível, dissipadores e bacias de sedimentação, além de enrocamentos em áreas suscetíveis à erosão fluvial. Foram executados mais de 123 km de canaletas e 1.339 estruturas de drenagem. A Tabela 2 apresenta os dados quantitativos de estruturas de drenagem construídas em cada uma das Unidades Construtivas.

Tabela 2 – Quantitativo acumulado de dispositivos de drenagem executados até o ano agrícola 2019/2020.

UNIDADE CONSTRUTIVA	CANALETA E CURVA DE NÍVEL (m)	BUEIRO/ DESCIDA D'ÁGUA/ DISSIPADOR DE ENERGIA/ GALERIAS (un.)	BACIA DE SEDIMEN-TAÇÃO (un.)	VOLUME DE ROCHA NO ENROCAMENTO (m^3)	CANALETA DE CONCRETO, SARJETA E MEIO-FIO (m)
Canais e Diques	49.236,83	554,00	66,00	4.551.429,61	9.865,25
Bela Vista	947,50	31,00	8,00	1.182,75	488,00
Belo Monte	24.851,20	196,00	119,00	11.051,39	6.195,32
Infraestrutura e Acessos	1.920,00	328,00	28,00	720,00	89.318,00
Pimental	46.144,80	230,00	83,00	19.622,77	4.105,00
Total	123.100,33	1.339,00	304,00	4.584.006,52	109.971,57

Fonte: CCBM (2020).

2.3 Plantio de Espécies Arbóreas e Herbáceas

A recuperação das áreas degradadas foi realizada por meio da implantação de cobertura herbáceo-arbustiva, destinada à proteção do solo e à ciclagem de

nutrientes, e do plantio de espécies arbóreas, voltado à aceleração das interações biológicas e ao restabelecimento das funções ecológicas. Entre os anos agrícolas de 2012/2013 e 2019/2020, foram recuperados 1.607,38 hectares em bota-foras, áreas de empréstimo e canteiros. A partir do ano de 2018/2019, utilizou-se somente o plantio em quincôncio, com densidade de 1.666 mudas por hectare, aliado à semeadura de herbáceas para cobertura rápida, inclusive em taludes e diques. Os dados consolidados encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Balanço Geral de Áreas plantadas acumuladas por Ano Agrícola (em hectares).

ANO AGRÍCOLA	PLANTIO HERBÁCEAS - HIDROSSEMEADURA (ha)*	PLANTIO HERBÁCEAS - MANUAL (ha)	PLANTIO ARBÓREAS – METODOLOGIA QUINCÔNCIO (ha)	PLANTIO ARBÓREAS - METODOLOGIA NUCLEAÇÃO (ha)	ÁREA TOTAL RECUPERADA (ha)
2012/2013	0,00	0,00	0,62	0,00	0,62
2013/2014	0,00	16,04	96,78	32,73	145,55
2014/2015	16,28	186,86	3,42	177,57	203,14
2015/2016	38,02	542,39	36,89	505,50	580,41
2016/2017	42,87	150,03	27,40	104,60	192,90
2017/2018	0,00	122,30	95,36	8,82	123,56
2018/2019	0,00	216,20	209,73	0,00	216,20
2019/2020	0,00	145,01	95,55	0,00	145,01
TOTAL	97,17	1.378,82	565,75	829,21	1.607,38

NOTA: * Dados exclusivos para áreas de PRAD, não incluindo taludes de estruturas definitivas, tais como diques, barragens e canal de derivação.
Fonte: CCBM (2020).

2.4 Monitoramento ambiental e geotécnico

O monitoramento do PRAD avalia a sobrevivência das mudas, cobertura vegetal, espessura da serapilheira, regeneração natural, presença de fauna e integridade das estruturas de drenagem.

O monitoramento das áreas em recuperação tem como finalidade avaliar o estabelecimento da vegetação por meio de indicadores quantitativos e qualitativos, incluindo taxa de sobrevivência das mudas, necessidade de replantio, ocorrência de pragas, cobertura herbácea do solo, eficiência dos sistemas de drenagem, desenvolvimento dos plantios e uso da área pela fauna. A metodologia foi aprimorada ao longo do processo, incorporando novos parâmetros físicos e bióticos que permitem uma análise integrada da condição de recuperação.

Inicialmente, o monitoramento concentrou-se na sobrevivência e no desenvolvimento das mudas nativas, abordagem aplicada entre o ano agrícola de 2013/2014 e a primeira campanha de 2018/2019. A partir da segunda campanha de 2018/2019, os ajustes metodológicos foram efetivamente implementados. As duas campanhas mais recentes abrangeram áreas de 1.060 ha e 1.045 ha, com parcelas amostrais

representando 9,6% do total monitorado. O parâmetro de referência adotado estabelece que a mortalidade das mudas deve ser inferior a 20%. Na primeira campanha de 2019, a mortalidade média registrada foi de 16%, enquanto a segunda campanha apresentou 20,9%. Sempre que identificadas áreas com mortalidade superior ao limite de referência, procede-se ao replantio para substituição das mudas perdidas, garantindo a continuidade do processo de recuperação.

O Programa de Monitoramento da Estabilidade das Encostas Marginais (PBA 10.3) monitora processos erosivos, estabilidade de taludes, efeitos de banzeiros, variação da lâmina d'água e suscetibilidade à erosão. Atualmente, 234 pontos são monitorados; entre suas metas está o acompanhamento das áreas revegetadas pelo Programa de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD – PBA 3.2) após o enchimento do Reservatório Intermediário.

Os pontos foram vistoriados com periodicidade trimestral até maio/2020; posteriormente, as inspeções passaram a ser semestrais. O monitoramento abrange 67 pontos do PRAD, avaliando a evolução da cobertura vegetal, a estabilidade dos taludes e a presença de processos erosivos.

As inspeções semestrais incluem registros fotográficos, que documentam a evolução da vegetação e a eficácia das medidas de recuperação. O monitoramento mostra que a manutenção da cobertura vegetal, o adensamento de gramíneas e proteção vegetal em trechos recém-escavados ou em fase de recuperação são fundamentais para a estabilização.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Evolução da cobertura vegetal

O PRAD alcançou:

- 96% de cobertura herbácea média;
- incremento da serapilheira de 1,20 cm para 2,24 cm;
- regeneração natural de 2,95% dos indivíduos.

Esses indicadores demonstram avanço no restabelecimento da ciclagem de nutrientes e no início da sucessão ecológica.

A seguir, são apresentados os resultados dos indicadores em comparação às metas estabelecidas para o Programa de Recuperação de Áreas Degradadas.

Indicador 1 – Sistema de Drenagem Implantado

Este indicador avalia o desempenho na implantação dos sistemas de drenagem, cuja meta é executar, no mínimo, 80% das estruturas planejadas para cada ano agrícola.

No Ano Agrícola 2018/2019 e no Ano Agrícola 2019/2020, as atividades previstas foram concluídas, alcançando 95% e 91% do quantitativo planejado, respectivamente, referentes à implantação de sistemas de drenagem definitivos. Assim, em ambos os períodos, a meta estabelecida foi atendida. Os percentuais de avanço obtidos podem ser visualizados na Figura 1.

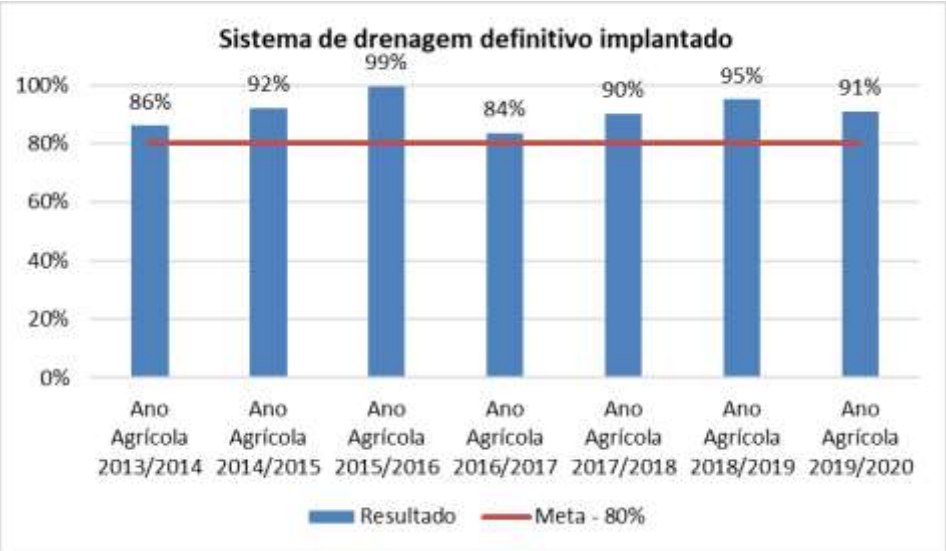


Figura 1 – Resultado do Indicador: Sistema de Drenagem Implantado.

Indicador 2 – Avaliação da Taxa de Sobrevivência das Mudas Plantadas

Este indicador tem como finalidade monitorar as áreas em recuperação, subsidiando a tomada de decisão quanto às ações de manejo mais adequadas a serem aplicadas nos plantios. Para isso, mensura-se a taxa de sobrevivência das mudas implantadas em campo.

Na 1ª Campanha de Monitoramento de 2019, observou-se uma pequena redução de 2% em relação à campanha anterior. Ainda assim, o resultado superou a meta estabelecida para o indicador, fixada em 80%.

Por outro lado, na 2ª Campanha de Monitoramento de 2019, a meta não foi atingida, registrando-se uma taxa de sobrevivência de 79%. Cabe destacar, conforme mencionado anteriormente, que são realizadas atividades de replantio de espécies arbóreas em todas as estruturas que não alcançam a meta, durante as manutenções subsequentes ao monitoramento, preferencialmente no mesmo ano agrícola. As taxas de sobrevivência das mudas ao longo dos anos podem ser visualizadas na Figura 2.

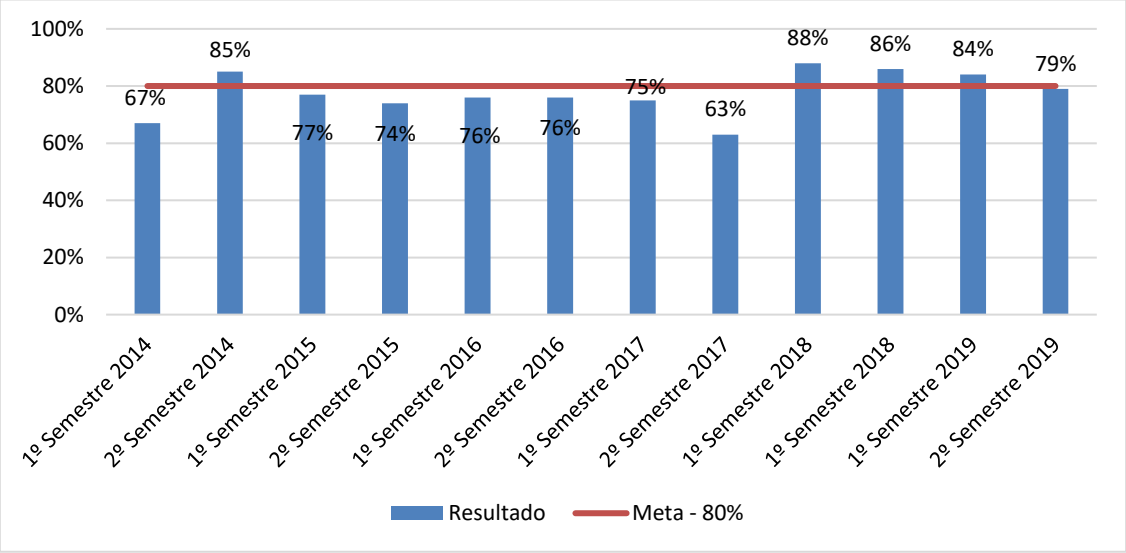


Figura 2 – Resultado do indicador: Avaliação da Taxa de Sobrevivência das Mudas Plantadas.

Indicador 3 - Esforço de Fiscalização Sobre as Áreas Interferidas

Este indicador tem como finalidade medir o cumprimento da meta de realizar, no mínimo, 80% das vistorias mensais previstas nos pontos de controle da obra. Consideram-se pontos de controle os locais que apresentam intensa atividade do processo executivo ou registros de desvios, demandando acompanhamento e monitoramento contínuos pela fiscalização do Programa Ambiental de Construção.

O índice de esforço de fiscalização no semestre atingiu 97%, superando a meta pactuada de 80% para acompanhamento dos pontos de controle. Esse desempenho pode ser verificado na Figura 3.

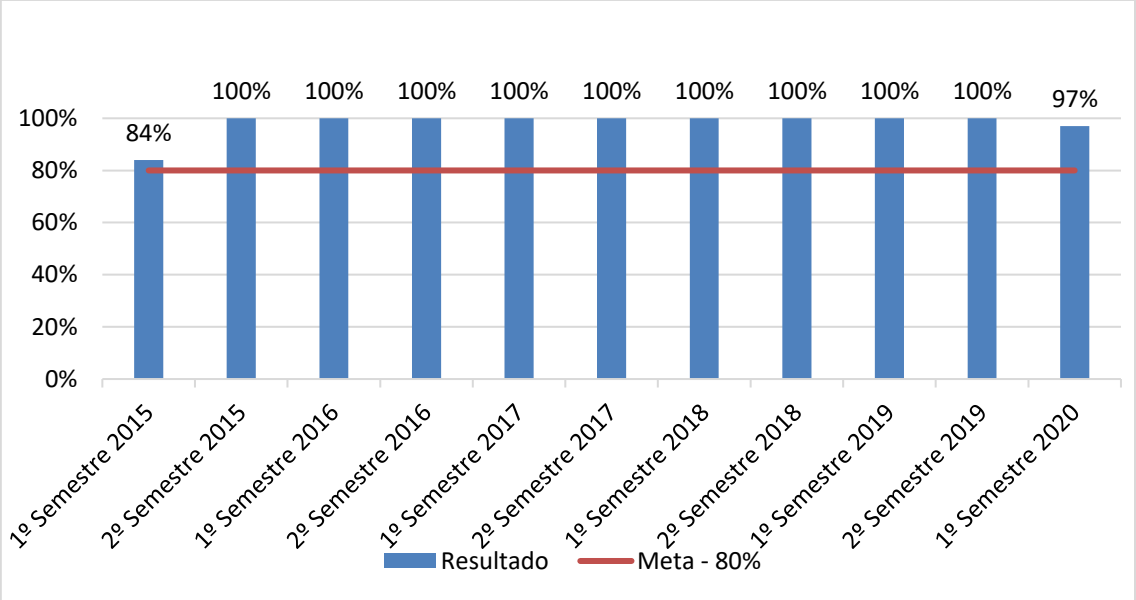


Figura 3 – Resultado do Indicador: Esforços de Fiscalização Sobre as Áreas Interferidas.

3.2 Estabilidade geotécnica das encostas

Ao longo do monitoramento, foi possível identificar e caracterizar os condicionantes, processos e mecanismos responsáveis pela instabilização das encostas marginais dos reservatórios, bem como das encostas de jusante da Casa de Força Principal e do sítio Pimental.

Com base nas investigações realizadas, verificou-se que o desencadeamento de processos erosivos e de instabilização nas encostas marginais está associado a diversos fatores — isolados ou combinados — entre os quais se destacam:

- a ação desagregadora do embate de ondas, resultante da atuação dos ventos e/ou da abertura dos vertedouros;
- a erosão superficial provocada pelas águas pluviais, tanto pelo escoamento superficial (influenciado pela declividade do terreno e pela velocidade do fluxo) quanto pela infiltração (que pode levar à saturação do solo e à perda de resistência);

- instabilidades localizadas ou generalizadas de taludes, evidenciadas pelo surgimento de crateras, ravinas e zonas de elevada erodibilidade;
- queda e rolamento de blocos soltos na zona marginal do reservatório ou ao longo das encostas;
- ações antrópicas, atividades animais e/ou desmatamento; e
- outros fenômenos naturais ou geotécnicos, como incêndios, colapso de solo, presença de materiais pouco consolidados, afloramentos de rochas brandas, inclinações acentuadas, zonas de fluxo intenso de águas fluviais ou pluviais, entre outros aspectos geomorfológicos desfavoráveis.

Além desses fatores, o regime pluviométrico regional e a flutuação do nível de água dos reservatórios e do rio exercem influência significativa, uma vez que a hidrodinâmica contribui para o processo natural de erosão fluvial, promovendo desgaste e remoção de sedimentos das margens monitoradas.

O uso antrópico das margens, anterior à implantação da usina, também acelera, em determinados trechos, o desenvolvimento de processos erosivos. A remoção da vegetação para construção de edificações, abertura de acessos ao rio ou aos reservatórios, práticas agropecuárias e atividades recreativas expõe o solo, tornando-o mais vulnerável ao escoamento superficial das águas pluviais e, consequentemente, mais suscetível ao desencadeamento ou intensificação da erosão.

Considerando as informações obtidas durante o monitoramento, o PBA 10.3 registrou: redução de sulcos erosivos em taludes revegetados; estabilização progressiva de áreas anteriormente críticas; influência marcante da hidrodinâmica dos reservatórios na erosão marginal. A Tabela 4 apresenta exemplos de pontos monitorados, nos quais foram implementadas ações de recuperação no âmbito do PRAD.

Tabela 4 – Balanço Geral de Áreas plantadas acumuladas por Ano Agrícola (em hectares).

Ponto	Situação detectada	Medida implantada
RI7	Talude de corte do canal de derivação com solo exposto na parte superior e enrocamento na sua base.	Executada proteção com enrocamento da base do talude, em função da presença de erosão laminar e em sulco devido ao escoamento superficial em solo arenoso, não sendo necessária a hidrossemeadura. Drenagem superficial implantada. As gramíneas estão se desenvolvendo. Declividade adequada.
		

Ponto	Situação detectada	Medida implantada
RI26	Antiga área de exploração, que ficou parcialmente submersa Solo com movimentação de terra e exposto devido a exploração da Jazida G1.	Grande parte do solo foi removida, para uso do material na reconformação de áreas em processo de recuperação. Restou uma pequena ilha com blocos rochosos.
		
RI46	Estrada que liga o travessão 45 ao 50.	Foram implantados dispositivos de drenagem, os cortes foram revegetados, foi instalada barreira de segurança na parte sinuosa da via de acesso, que foi capeada com brita e os drenos foram preenchidos com blocos rochosos.
		
RI47	Continuação da estrada que liga o travessão 45 ao 50.	A via foi capeada com brita, os drenos laterais foram preenchidos com blocos rochosos e a vegetação rasteira cresceu sobre os drenos, os cortes se encontram revegetados por gramíneas.
		

Ponto	Situação detectada	Medida implantada
76	BF-32; antiga área de bota-fora.	Foi realizado plantio de espécies herbáceas e arbóreas nativas da região em uma área de 60,19 ha através da metodologia de nucleação, durante os períodos agrícolas de 2014/2015 e 2015/2016.
		
79	AE-3, antiga área de empréstimo.	Área reconformada e protegida com gramíneas e pequenos arbustos, foi realizado plantio de espécies herbáceas e arbóreas nativas da região em uma área de 15,46 ha, através da metodologia de nucleação.
		
86	BVSA.	Foram realizados serviços de conformação, revegetação e drenagem, se observa o adensamento da vegetação.
		

3.3 Sinergia entre o PRAD e o monitoramento de estabilidade de encostas

A integração entre os programas permitiu:

- identificar áreas onde a revegetação reduziu a erodibilidade;
- orientar intervenções corretivas em trechos instáveis;
- ajustar metodologias de plantio e manutenção;
- aprimorar o planejamento anual de recuperação.

Essa abordagem integrada reforça a segurança das estruturas marginais e a resiliência ecológica das áreas recuperadas.

4. CONCLUSÕES

O desempenho ecológico das áreas recuperadas evidencia avanços importantes. O monitoramento registrou melhora expressiva da cobertura vegetal, incremento da serapilheira e bom desenvolvimento das espécies arbóreas, reforçando a evolução da sucessão ecológica. Em trechos onde foram necessárias intervenções de manutenção, observou-se recuperação acelerada, confirmando a eficácia das ações corretivas.

A adoção de novas metodologias de plantio, especialmente o uso de herbáceas para cobertura rápida e o arranjo em quincôncio para espécies arbóreas, resultou em maior proteção do solo, redução de processos erosivos laminares e aumento da ciclagem de nutrientes.

A integração entre o PRAD e o Programa de Monitoramento da Estabilidade das Encostas Marginais (PBA 10.3) consolidou uma abordagem sinérgica entre recuperação ecológica e estabilidade geotécnica. A revegetação contribuiu para reduzir a erodibilidade, enquanto o monitoramento geotécnico orientou intervenções em trechos instáveis, fortalecendo a segurança das margens dos reservatórios.

O monitoramento indica que, nas áreas do PRAD, a revegetação contribuiu para reduzir a suscetibilidade erosiva, embora pressões externas — como uso agropastoril e remoção de vegetação em áreas vizinhas — ainda representem riscos; portanto o controle das condições estabelecidas em zonas intocadas se faz também fundamental **[2]**.

Em síntese, o PRAD da UHE Belo Monte demonstra que a recuperação ambiental em larga escala é viável e eficaz quando sustentada por planejamento técnico, monitoramento contínuo, metodologias adaptativas e integração entre programas. Os resultados alcançados — alta cobertura vegetal, regeneração natural crescente, estabilização de taludes e melhoria da funcionalidade ecológica — reforçam a importância de estratégias integradas para a resiliência ambiental e a segurança das estruturas marginais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] NORTE ENERGIA (2020) – 18º RC – CAP 2 – REL – 3.2

[2] NORTE ENERGIA (2025) – 26º RC – CAP 2 – REL – 10.3

	**Joyce PINHEIRO DE OLIVEIRA FIORI** Geóloga, mestre em Geociências Aplicadas e especialista em gestão de recursos hídricos, com 19 anos de atuação em monitoramento de estabilidade de encostas e processos erosivos, além de hidrogeologia aplicada a empreendimentos hidrelétricos. Responsável por diagnósticos geoambientais e avaliação de desempenho hidrogeotécnico em usinas como Belo Monte, Estreito e Lajeado.
	**Leandro VIEIRA SANTOS KROGER** Graduado em Gestão Ambiental, pós-graduação em Gestão de Recursos Hídricos e Gestão de Projetos. Mais de 12 anos de experiência no setor elétrico, atuando na gestão de licenciamentos, programas e projetos do meio físico e biótico. É Analista Socioambiental Sênior na Norte Energia, com atuação em condicionantes ambientais e monitoramentos de qualidade da água superficial e subterrânea, limnologia, hidrogeologia, erosão, encostas e sismicidade na UHE Belo Monte.
	**Roberto LEANDRO DA SILVA** Biólogo e mestre em ecologia e produção sustentável. Mais de 20 anos de experiência na gestão e execução de monitoramentos e mitigações socioambientais em projetos estruturantes do setor elétrico. Atua na Norte Energia desde 2013, atualmente é Gerente de Meios Físico e Biótico, ligado a mais de 40 projetos, que atendem às condicionantes do licenciamento da UHE Belo Monte.
	**Bruno GONÇALVES BAHIANA** Engenheiro Agrícola e Ambiental pela UFF, com pós-graduação em MBA em Petróleo, Gás e Energia (UVA) e em Antropologia (Unyleya). Mestre em Biodiversidade e Conservação (UFPA). Possui formação complementar pelo MIT, Harvard e FGV, e atua há mais de 15 anos no gerenciamento, avaliação e monitoramento de projetos socioeconômicos e ambientais no setor de energia. Atualmente, é Superintendente Socioambiental e do Componente Indígena da Norte Energia.
	**José Maria MARTINS DO NASCIMENTO JÚNIOR** Engenheiro Florestal (UFPR), especialista em Recuperação de áreas degradadas (UFV). Atua na UHE Belo Monte (Norte Energia) com gestão de contratos de PRAD na Amazônia. Experiência em restauração (>2400 ha), com foco em planejamento e avaliação de desempenho por indicadores estruturais e funcionais.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3 (ASPECTOS E PRÁTICAS AMBIENTAIS NO PROJETO, CONSTRUÇÃO, OPERAÇÃO E DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS E TSF S)
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

REMOÇÃO DE BARRAGENS – MÉTODOS PARA TOMADA DE DECISÃO E ESTUDOS DE CASO AO REDOR DO MUNDO

Cecília MACHADO
Mestre em Engenharia Civil - CEFET-MG

Diego BALBI
Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - CEMIG

Hersília SANTOS
Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - CEFET-MG

Elisângela MARTINS DE SÁ
Doutora em Engenharia de Produção - CEFET-MG

Rogério AZEVEDO
Doutor em Gerenciamento de Riscos - CEFET-MG

RESUMO

Existem diversas estruturas hídricas que já não exercem plenamente a função para a qual foram inicialmente projetadas, em alguns casos por obsolescência, restrições à operação ou limitações ambientais. Diante desse cenário, que se observa em diferentes países, a remoção de barragens passa a ser uma alternativa a ser considerada. Trata-se, porém, de intervenções complexas, que envolvem a análise de diversos *trade-offs*, tais como a melhoria da qualidade da água e da conectividade fluvial (externalidade positiva) pode vir acompanhada de impactos sociais, como perda de empregos, receitas e usos múltiplos da água (externalidade negativa). Nesse contexto, métodos analíticos constituem instrumentos importantes para apoiar a tomada de decisão. Este trabalho examina, principalmente, os métodos multicritério e multiobjetivo, bem como decisões reativas decorrentes de tragédias, determinações legais ou outras provocações institucionais. A partir da revisão da literatura e da análise de estudos de caso internacionais, discutem-se as potencialidades e limitações dessas abordagens. Com isso, busca-se contribuir para o aprimoramento da gestão da infraestrutura hídrica existente.

Palavras-chave: Análise de portfólio, gestão integrada de recursos hídricos, métodos para tomada de decisões.

ABSTRACT

There are several water structures that no longer fully fulfill the function for which they were initially designed, in some cases due to obsolescence, operational restrictions, or environmental limitations. Given this scenario, which is observed in different countries, dam removal becomes an alternative to be considered. However, these are

complex interventions that involve the analysis of various trade-offs: improvements in water quality and river connectivity (positive externalities) may come with social impacts, such as job losses, revenue reduction, and impacts on multiple water uses (negative externalities). In this context, analytical methods constitute important tools to support decision-making. This study primarily examines multicriteria and multiobjective methods, as well as reactive decisions resulting from disasters, legal determinations, or other institutional provocations. The potential and limitations of these approaches are discussed in this paper based on a literature review and the analysis of international case studies,. The aim is to contribute to the improvement of existing water infrastructure management.

Keywords: Portfolio analysis; water planning; decision-making methods

1. INTRODUÇÃO

A análise de remoção de barragens pode ocorrer por diversos motivos, como por exemplo: obsolescência das estruturas, mudanças de legislação, priorização de outros usos da água, recuperação do fluxo do rio e até mesmo acidentes são alguns dos motivos que podem levar a essa decisão [1].

Na prática o acúmulo de sedimentos nos reservatórios é um dos principais gatilhos para a remoção de barragens pois reduzem a capacidade de armazenamento de água e provocam impactos na geração de energia no caso de hidrelétricas. Em outros tipos de barragens a remoção pode estar associada ao fim da atividade econômica no local ou a outros usos da água [2].

Além disso, é mais comum a remoção de pequenas barragens (Figura 1), pois costumam ser estruturas mais antigas, que não cumprem mais sua função econômica e geram menor comoção da população local com a sua retirada [3].

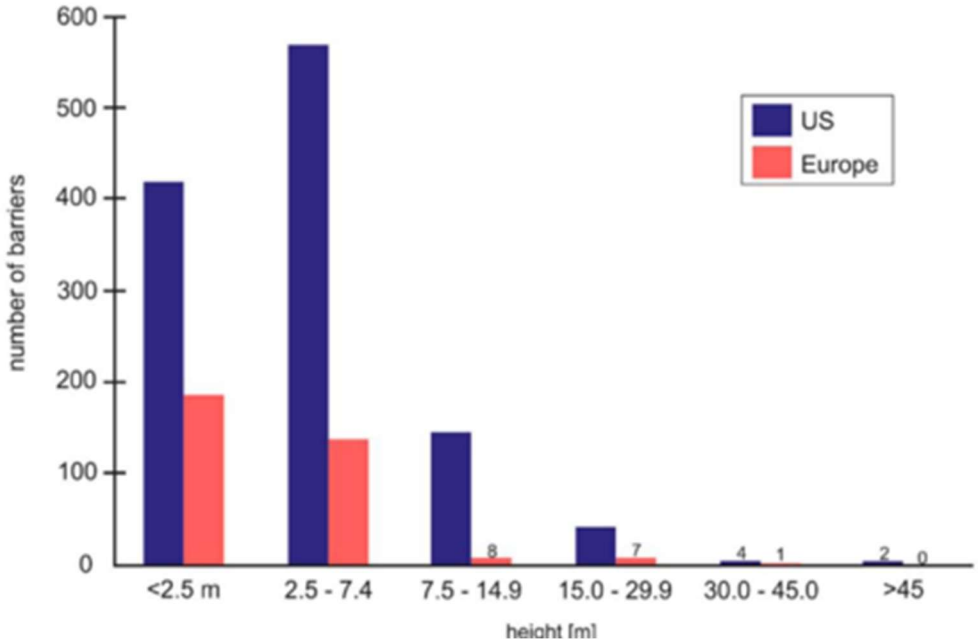


Figura 1: Idade das barragens removidas – Fonte: (Habel et al., 2020)

Mesmo em casos em que se entende que é vantajoso para a bacia de forma geral que a barragem seja removida, pode existir resistência por parte das comunidades locais que não desejam ter a paisagem alterada, fazem outros usos do reservatório, ou até mesmo temem pela desvalorização dos imóveis. Por parte das concessionárias que operam o barramento podem ocorrer pedidos de compensação financeira pelo fim da atividade econômica, além disso os custos de remoção costumam ser elevados [4].

1.1 Análise de trade-offs nos estudos de remoção de barragens

Intervenções de grande impacto como é o caso das remoções de barragens exigem que se analise como a melhora de um dos objetivos, por exemplo o de reconectar trechos dos rios, impactam em outros objetivos, como os econômicos. Estudando toda a bacia para se tomar a decisão é possível descrever esses trade-offs em gráficos (Figura 2) como foi feito em 2005 ao se estudar a bacia do rio

Willamette. São simulados pelo autor como critério econômico e demarcado em cada uma das linhas a perda de potência instalada, a de volume acumulado e um terceiro cenário onde se consideram igualmente estes itens, sendo 50% do valor econômico a água armazenada e 50% a perda de potência instalada [5].

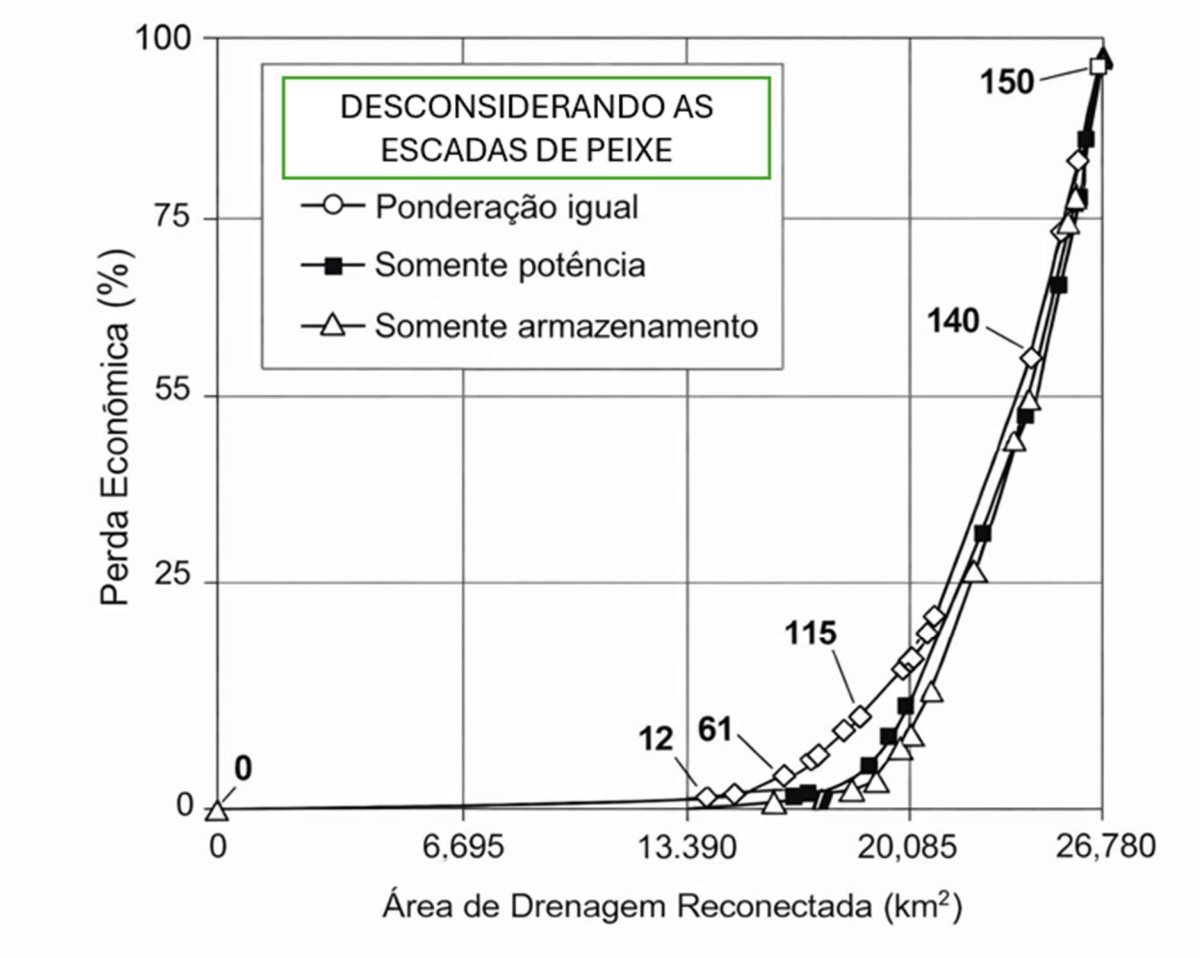


Figura 2: Estudo de Trade-Off para remoção de barragens na bacia do Willamette – Tradução Nossa - Kuby,2005.

O gráfico da Figura 2 permite visualizar a área reconectada (externalidade positiva) e o impacto econômico da remoção dos barramentos (externalidade negativa) para cada um dos cenários, esta é uma importante ferramenta que permite analisar de forma conjunta mais de um critério, neste caso é possível visualizar como a variável ambiental (área de drenagem), se relaciona com a variável econômica, percebendo que neste caso mais de 50% da área poderia ser reconectada com menos de 10% de impactos econômicos.

2. MÉTODOS PARA A ANÁLISE DE REMOÇÃO DE BARRAGENS

São tipos principais de análise para a remoção de barragens: otimização matemática, pontuação e classificação (scoring and ranking), conhecimento local (local knowledge) e a resposta a questionamentos ou falhas [4].

A otimização matemática é o método mais analítico para a realização desse tipo de estudo, visto que utiliza modelos matemáticos para analisar o efeito em cascata da

remoção de estruturas. Esse método é especialmente útil quando é necessário analisar o efeito da remoção de determinada estrutura em uma bacia ([5], [6], [7]).

Os métodos do tipo pontuar e classificar (scoring and ranking) são mais flexíveis para a análise de múltiplos objetivos e podem ser utilizados por tomadores de decisão com menor expertise matemática, o ponto negativo é que são menos precisos e estão sujeitos a maior subjetividade[8], [9].

As abordagens baseadas em conhecimentos locais e respostas a fenômenos embora possam ser oportunidades de ação rápida estão mais sujeitas a vieses e são menos precisas, podendo sujeitar o tomador de decisão a não fazer bom uso dos recursos disponíveis.

O Quadro 1 demonstra os pontos fortes e fracos de cada uma dessas metodologias.

Quadro 1: Métodos para a remoção de barragens (Adaptado pela autora a partir do estudo de McKay, 2020[10])

MÉTODO	TIPO	PONTOS FORTES	PONTOS FRACOS
OTIMIZAÇÃO MATEMÁTICA	MULTIOBJETIVO	. ANALITICO E TRANSPARENTE; .GERA SOLUÇÕES ÓTIMAS (MAXIMIZA OU MINIMIZA); .PERMITE ANÁLISE EM CASCATA; .QUANTIFICA OS OBJETIVOS.	. INCERTEZAS NOS DADOS IMPACTAM OS RESULTADOS; .DIFICULDADE DE INCLUSÃO DE FATORES NÃO QUANTIFICÁVEIS.
PONTUAR E CLASSIFICAR (SCORING AND RANKING)	MULTICRITÉRIO	. FLEXÍVEL PARA MÚLTIPLOS OBJETIVOS; .MENOR COMPLEXIDADE MATEMÁTICA	. DEPENDE DE ANÁLISES SUBJETIVAS; .NÃO VERIFICA DE FORMA DIRETA A RELAÇÃO ENTRE BARRAGENS.
CONHECIMENTO LOCAL (LOCAL KNOWLEDGE)		. MAIS SENSÍVEL A FATORES SOCIAIS E ECOLÓGICOS .MENOR ESFORÇO TÉCNICO	. INFLUÊNCIA DE VIESES DOS PARTICIPANTES; .DIFICIL DE ESCALONAR; .REQUER CONHECIMENTO PROFUNDO DO LOCAL.
RESPOSTA A QUESTIONAMENTOS OU A FALHAS	SEM MÉTODO	. REAÇÃO A PEDIDO DE REMOÇÃO OU A FALHA ESTRUTURAL	. SEM PLANEJAMENTO; .USO INEFICIENTE DE RECURSOS; .RISCOS ALTOS (VIDAS, ATENDIMENTO A EMERGÊNCIAS E DANOS.

3. ESTUDOS DE CASO SOBRE REMOÇÕES DE BARRAGENS

Nessa seção serão analisados casos de remoção de barragens internacionais e um caso nacional, onde serão comparadas as decisões tomadas com os métodos descritos na seção 2 deste artigo.

3.1 Remoção de barragens no rio Romanche

Entre os anos de 2018 e 2023 foram removidas seis barragens no vale do rio Romanche devido a necessidade de restaurar o fluxo do rio (questão ecológica/ambiental), e a obsolescência das estruturas existentes. Além disso, a barragem de Séchilienne, construída em 1917 apresentava diversos riscos geológicos atrelados a desmoronamentos e já precisava ser removida [11].

Associado a isso no ano de 2001 a EDF (Empresa de eletricidade da França) iniciou os estudos para a renovação das concessões das usinas, que demonstrou que seria mais interessante realizar a remoção de barragens e ampliar a potência instalada na cascata. A sequência dos eventos está demonstrada na linha do tempo (Figura 3) [11].

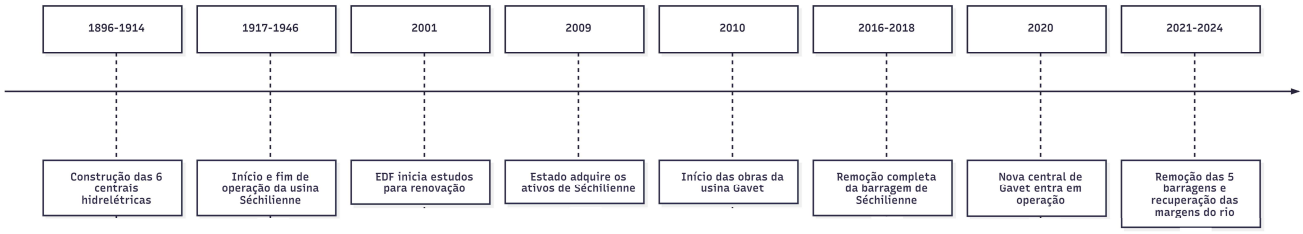


Figura 3: Linha do tempo dos eventos de Romanche

Com capacidade instalada de 97 MW (40% superior ao arranjo anterior) (Figura 4), a nova usina não apenas recuperou a continuidade ecológica e os habitats naturais, mas também promoveu, por meio de ações de reflorestamento [11], a recuperação de áreas degradadas e a restauração das margens do rio.

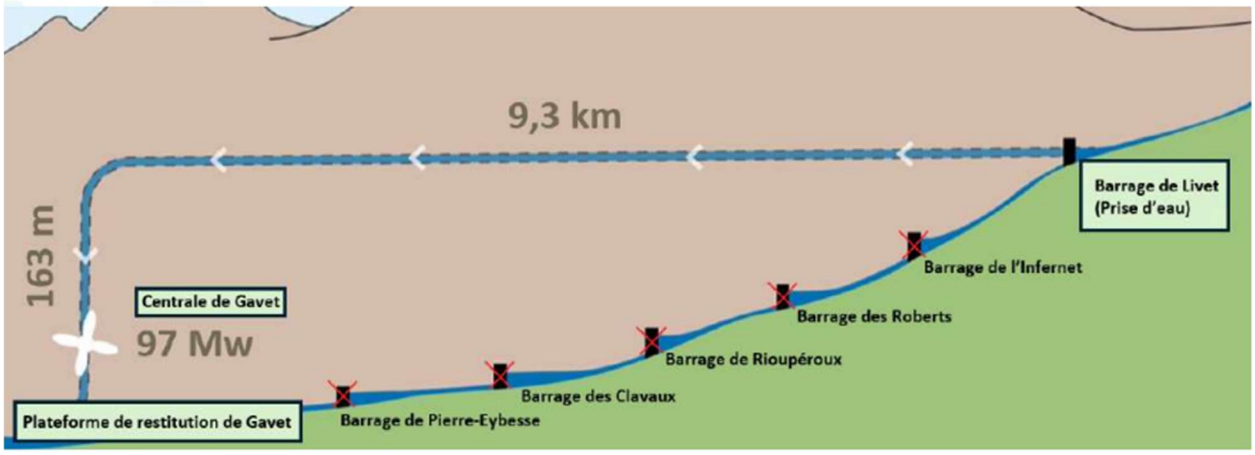


Figura 4: Novo arranjo de geração de energia na cascata (Fonte: ERN [11])

3.2 Remoção de barragens no rio Sélune

A remoção das barragens de Vezin e La Roche Qui Boit, no rio Sélune enfrentou forte oposição da comunidade local. Isso ocorreu pois à percepção dos moradores é de que os barramentos garantiam o controle das cheias, irrigação, abastecimento de água, energia, bem como diversos outros usos. Além disso, o argumento ecológico de que remover as barragens melhoraria a migração de salmões foi considerada elitista por parte dos moradores do entorno do lago que fazem o uso da água represada para a pesca de carpas e robalos [12].

Ao responder questionários sobre a remoção das barragens a população se mostrou contrária a intervenção (Tabela 1). Foi aplicado para este estudo de remoção o método multicritério do conhecimento local que tem como vantagem ser mais sensível a fatores sociais [2].

Tabela 1: Enquete sobre a remoção de Barragens do Sélune – Tradução Nossa de Boucher & Hudson, 2023

Pergunta	Respostas (%)	
	Contra	**Neutro**
Você é a favor ou contra a remoção das barragens de Vezins e La Roche-Qui-Boit?	78,60%	21,40%
	Sim	**Não**
Você está ciente da remoção das barragens de Vezins e/ou La Roche-Qui-Boit?	100%	0%
Você se sentiu envolvido(a) no projeto de remoção das barragens?	71,40%	28,60%
Você considera que foi suficientemente informado(a) sobre o projeto de remoção das barragens?	21,40%	78,60%
Você teve a oportunidade de expressar sua opinião sobre a demolição das barragens?	21,40%	78,60%
Você acha que influenciou a decisão de remover as barragens?	0%	100%
Você sabia que um programa científico está estudando o projeto de remoção das barragens?	28,60%	71,40%
Você gostaria de acessar mais informações sobre o projeto de demolição das barragens via um código QR disponível nos comércios locais?	50%	50%

Em 2009 foi tomada a decisão de não renovação das concessões, especialmente devido a necessidade de restaurar os trechos de migração para salmões e enguias que são consideradas espécies prioritárias pela União Europeia, também foram fatores a contaminação do rio com metais pesados, evidenciado pelo elevado número de algas e baixos níveis de oxigênio presentes no rio. A linha do tempo de eventos está representada na Figura 5 [2].

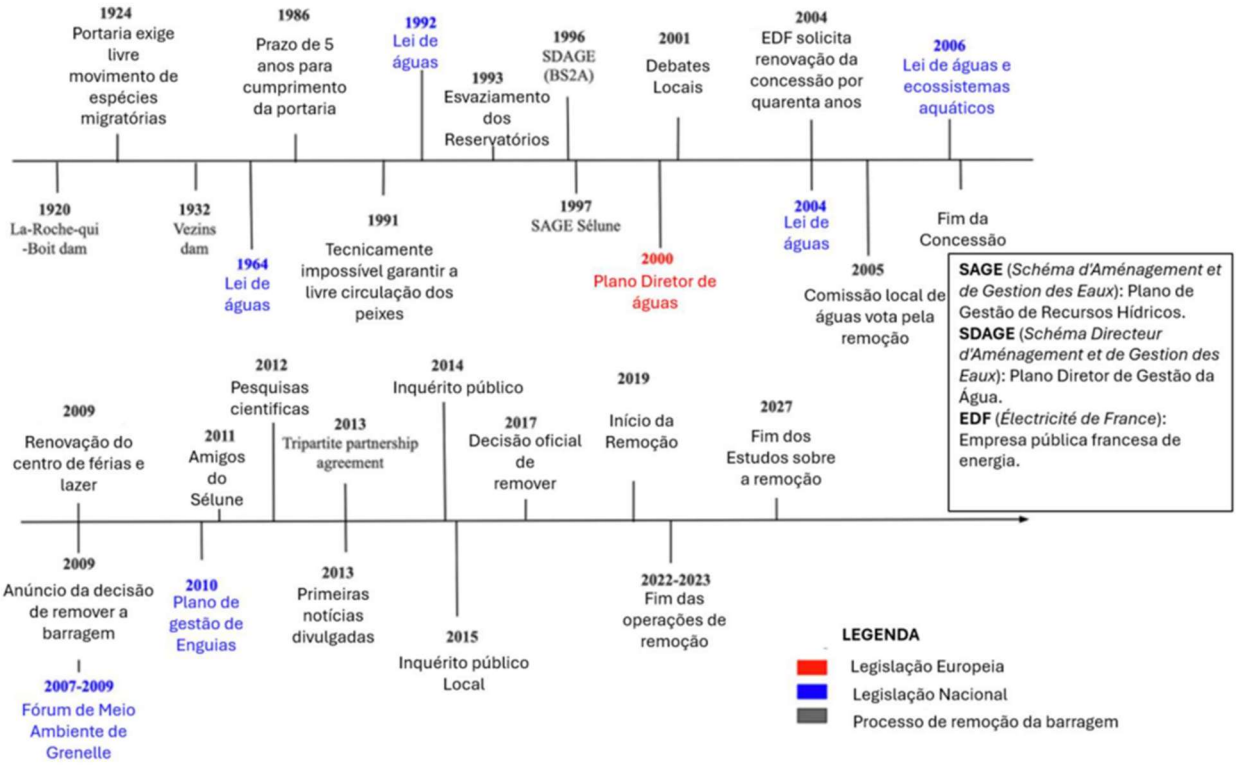


Figura 5: Linha do Tempo - Remoções de Barragens do Sélune-Tradução Nossa de Boucher & Hudson, 2023

Para a realização do projeto foi necessário providenciar a remoção de mais de 330 mil m³ de sedimentos, providenciar o resgate de cerca de 17 toneladas de peixes além da demolição das estruturas entre os anos de 2019 e 2023 (Figura 6) [2].



Figura 6: Remoção das Barragens de Vezin (Esquerda) e La Roche Qui Boit (Direita) – Fonte: ERN, 2025

Mesmo com a resistência da população local as remoções das barragens foram concluídas, e com isso foram obtidos resultados ecológicos, como o retorno de espécies de peixes migratórios no primeiro ano da intervenção, melhora dos indicadores de qualidade da água e redução do acúmulo de sedimentos. O temor da população quanto ao aumento de enchentes com o fim dos reservatórios não se consolidou nas cheias posteriores a remoção [12].

3.3 Remoção de barragens no rio Klamath

Foram removidas quatro barragens no rio Klamath reconectando 650 Km de rio para a migração de salmões. Esse é considerado o maior projeto de remoções de barragens já executado nos Estados Unidos. As características das barragens removidas estão descritas na Tabela 2 [13].

Tabela 2: Características das Barragens – Tradução Nossa – KRRC, 2025.

Nome da Barragem	Ano de Construção	Potência	Área do Reservatório	Capacidade do Reservatório (hm³)	Tipo de Barragem	Altura da Barragem
J.C. Boyle	1958	98 MW	170 hectares	4,31 hm³	Aterro (terra)	21 metros
Copco 1	1918	20 MW	405 hectares	57,84 hm³	Concreto	38 metros
Copco 2	1925	27 MW	16 hectares	0,09 hm³	Concreto	10 metros
Iron Gate	1962	18 MW	382 hectares	71,54 hm³	Aterro (terra)	53 metros

Diferentemente de diversos projetos de remoção de barragens ocorridos na Europa que tiveram como causa principal motivos ambientais, no caso das barragens do Klamath um dos principais fatores decisórios foram os diversos conflitos socioambientais entre agricultores e povos originários quanto ao uso da água. Os agricultores faziam o uso da água represada para irrigação e os povos indígenas reinvindicavam que o fluxo do rio fosse restaurado devido a importância da pesca do salmão em sua cultura [14].

Outro fator que influenciou na tomada de decisão foi o custo das condicionantes ambientais para a renovação das licenças de operação estimados em trezentos milhões de dólares. A sequência de eventos que levou a essa tomada de decisão está descritas no Quadro 2 [15].

Quadro 2: Eventos que levaram a remoção das barragens no Klamath

Ano	Eventos
1908-1962	Construção das 4 barragens (Iron Gate, Copco 1, Copco 2 e J.C. Boyle)
1956	Licença original do projeto hidrelétrico (fim da licença em 2006)
2001	Seca severa e o governo interrompe irrigação para proteger peixes - produtores rurais ficam insatisfeitos
2002	Morte de 33.000 salmões na parte baixa do rio
2004	PacificCorp pede renovação de licença SEM passagem para peixes
2005	Estudos apontam custo de remoção de US$ 100 milhões (no final as obras ficaram em cerca de US$450 milhões)
2010	Direitos das tribos de fazerem o uso preferencial do rio reconhecido e foi tomada a decisão de remover as 4 barragens
2020-2023	Desativação, drenagem e início da demolição em cascata
2024	**Remoção concluída** – 650 km de rio reconectados

A remoção da barragem do Klamath trouxe benefícios para partes da população considerando os ganhos com os incrementos nas atividades de pesca e ao mesmo tempo gera danos para as populações atingidas com a perda da água armazenada usada na agricultura e perda dos empregos gerados nas usinas hidrelétricas. Os pontos positivos e negativos estão relacionados no Quadro 3.

Quadro 3: Pontos positivos e negativos das remoções no Klamath – Adaptado de Kruse e Scholz (2006).

Impacto	Condado de Siskiyou	Em termos econômicos
Remoção das barragens	Positivo-Empregos gerados e movimentação da economia no período da obra.	Ver item economia local
Energia	Neutro-O condado não é responsável por encontrar fonte alternativa Negativo-Caso o valor das contas de energia suba.	Desconhecido
Valores das propriedades	Negativo-Perda da vista para o lago e incerteza sobre quem tem o direito sobre as terras que estavam alagadas	Desconhecido
População de peixes	Positivo	Estimado em US$ 4,5 milhões de dólares assumindo que a população de peixe aumente em 100%
Economia local	Positivos - Despesas com as obras de remoção e geração de empregos com a remoção das barragens, aumento do turismo, visitantes Negativos - Perdas de empregos nas usinas existentes e impostos do projeto hidrelétrico	Era estimado US$ 172 milhões, sendo 73 milhões com a obra. Sabe-se atualmente que os custos ficaram em torne de US$ 450 milhões de dólares
Pesca comercial, recreativa e de subsistência	Positivo	Ver item população de peixes
Valores culturais	Positivo	Desconhecido
Recreação (não pesca)	Desconhecido	Desconhecido
Fluxo do rio restaurado	Positivo	US$ 104 milhões

3.4 Remoção de barragens no Brasil: Barragem do Cipó

A legislação brasileira diz que as barragens que não estão mais em uso devem ser recuperadas, desativadas ou descaracterizadas [16].

Um caso recente no Brasil de barragem de água que está sendo removida é o da barragem do Cipó em Caruaru no estado do Pernambuco. Existe o relato que a barragem está desativada desde a década de 1960, servia para a regularização de vazões e abastecimento público [17]. A barragem antes da decisão de remoção se encontrava em risco de colapso apresentando vazamentos e percolação de águas no talude [18].

A decisão da remoção foi judicialmente imposta a partir de relatórios técnicos que destacavam problemas no barramento, as decisões ocorreram conforme a sequência de fatos demonstrada na Figura 7 [18].

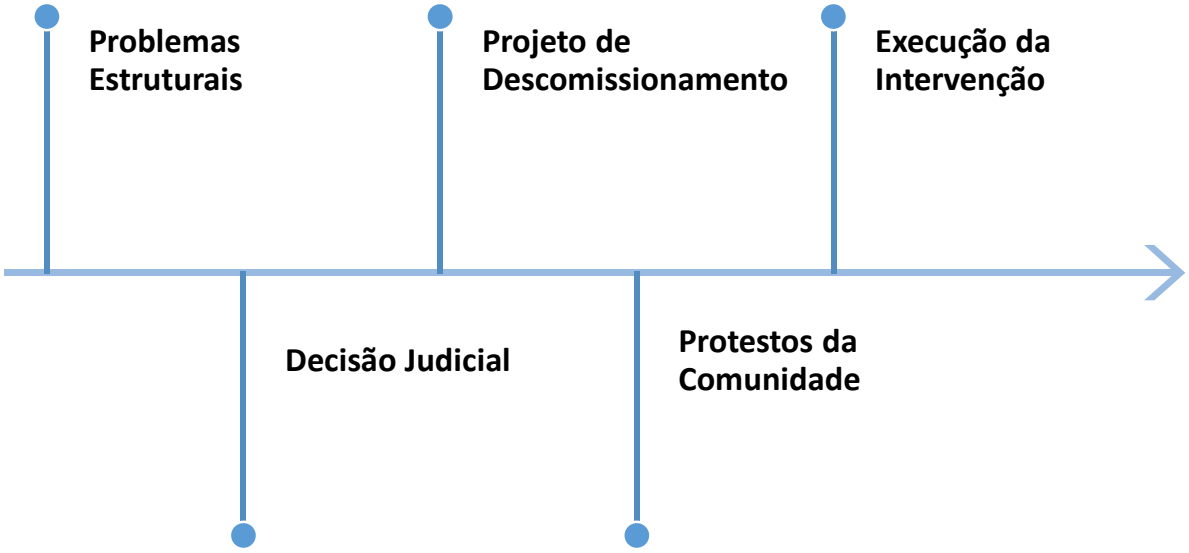


Figura 7: Sequência de fatos - Barragem do Cipó

Mesmo apresentando condições de risco e não sendo mais utilizada nem pela prefeitura nem pela companhia responsável pelo serviço de abastecimento, ocorreu oposição da comunidade local a remoção da barragem visto que alegavam fazer uso da água do barramento para diversas atividades, como dessedentação animal e suprindo intermitências do sistema de abastecimento de água local [17].

Percebe-se que nesse caso a decisão não partiu de um estudo quanto ao melhor uso dos recursos hídricos, melhora em indicadores sócio-econômicos ou ambientais. E sim, como resposta a problemas estruturais e a uma decisão do ministério público quanto a solução daquele problema. Dessa maneira pode-se classificar essa remoção como sendo predominantemente uma resposta a questionamentos ou falhas [10], em que assim como descrito na literatura apresenta menos planejamentos e maiores riscos aos envolvidos.

Diferentemente dos outros casos analisados sobre remoção de barragens nesse caso a questão principal não foi ecológica e sim um risco elevado de colapso estrutural. Mesmo com risco elevado a segurança ocorreram oposições da comunidade local assim como relatados nos outros estudos internacionais destacando a necessidade de criação de mecanismos de compensação mais robustos para as populações afetadas pelo fim desses reservatórios [10].

4. ESTUDOS DE CASO SOBRE NÃO REMOÇÕES DE BARRAGENS

4.1. ESTUDO DE CASO DA BACIA DO WILLAMETTE

As barragens localizadas na bacia do rio Willamette geram apenas 1% da energia do noroeste dos Estados Unidos e possui 13 barragens consideradas economicamente deficitárias. Ainda não existem relatos de remoção de estruturas significativas nessa bacia, mesmo sendo considerada uma região prioritária para a migração e reprodução de Salmões [19].

Essa região foi estudada em 2005 por meio de método multicritério, onde por meio da elaboração de um modelo matemático foi demonstrado que a remoção de 12 barragens reconectaria 52% da área da bacia com impacto econômico de apenas 1,6%. A remoção de 61 barragens traria para a bacia 60,9% de conectividade com 3,6% de perdas econômicas [5].

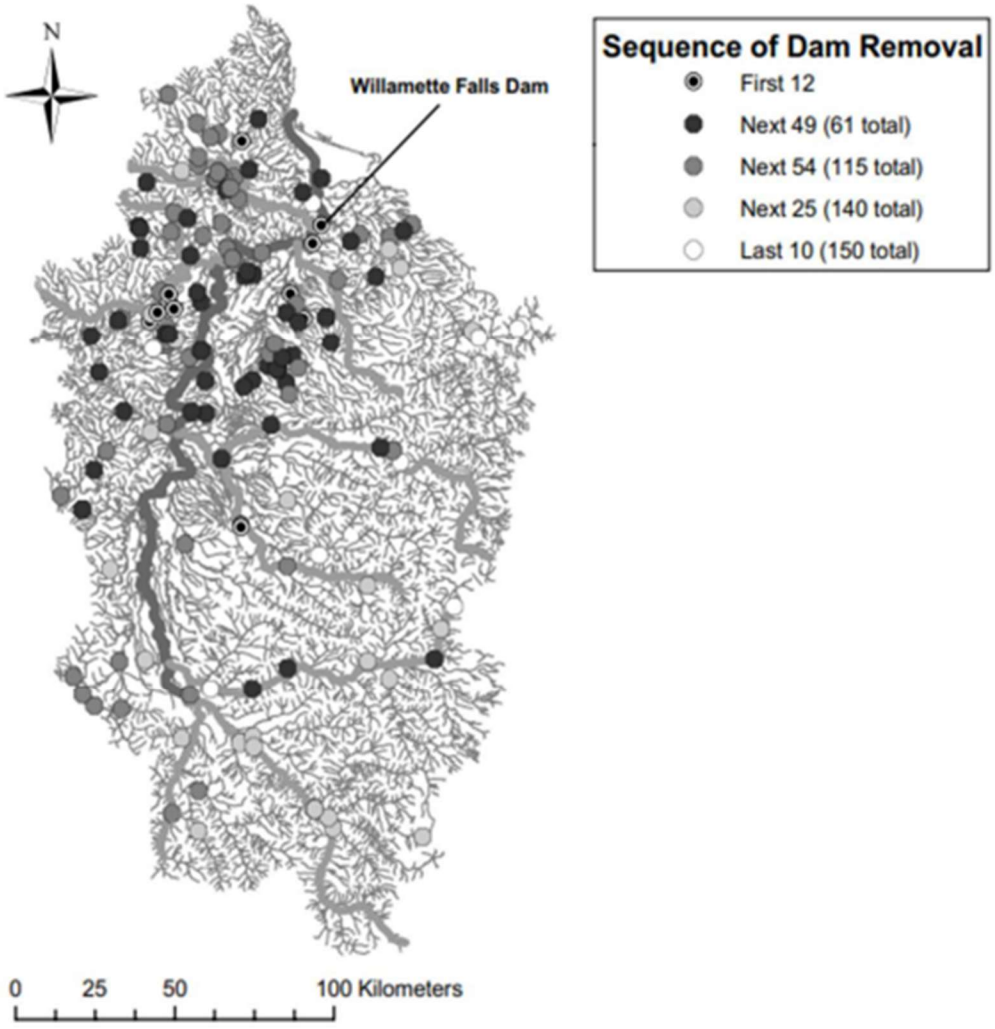


Figura 8: Sequência de Barragens a serem removidas na bacia do Willamette – Fonte: Kuby, 2005

O estudo definiu a perda econômica como uma composição de capacidade de estocar água e gerar energia elétrica, o autor fez o uso das curvas de *trade-off* já demonstradas na introdução deste trabalho para auxiliar nas tomadas de decisão. A diferença deste trabalho desenvolvido é que ele coloca os objetivos como funções objetivos que maximizam objetivos desejados e minimizam os indesejados.

Também existiram estudos com abordagem multicritério onde foram atribuídas pontuações para externalidades positivas (regularização de vazões, geração de energia, recreação) e negativas (mortalidade de peixes, aumento da temperatura da água e riscos de segurança) das barragens, classificando dessa forma quais seriam boas candidatas a remoção [20]. As pontuações negativas indicam quais seriam boas candidatas a remoção (Tabela 3).

Tabela 3: Candidatas a remoção na Bacia do Willamette – Nagel, 2017

Nome da Barragem	Pontuação
Dorena	-5.00
Fern Ridge	-4.99
Cottage Grove	-3.97
Big Cliff	-2.51
Dexter	-2.11
Fall Creek	-1.80
Blue River	-1.38
Green Peter	-0.94
Hills Creek	-0.05
Foster	0.17
Lookout Point	0.77
Cougar	1.80
Detroit	2.94

Existe um interesse por parte dos povos nativos em incrementar a migração de salmões nessa região, porém existem diversos outros usos da água que tornam complexa a realização da remoção dessas estruturas, como por exemplo a existência das concessões, elevados custos das obras de remoção e outros usos da água, que geram resistência por parte das populações. Apesar dos estudos detalhados ainda não foi realizada a remoção de nenhuma barragem nessa bacia.

CONCLUSÕES

A análise de múltiplos casos de remoção de barragens, ou estudos que foram desenvolvidos sem que ocorresse a execução das retiradas, permitiu identificar o uso dos diversos métodos para tomada de decisões, esses métodos estão descritos no Quadro 4.

Quadro 4: Análise dos estudos de caso por método

MÉTODO	TIPO	ESTUDO DE CASO	MOTIVO	DESFECHO
Otimização Matemática	Multiobjetivo	Bacia do Willamette (EUA)	Avaliar *trade-offs* entre reconexão de rios (área de drenagem) e impacto econômico (perda de geração e armazenamento)	**Não remoção** (até o momento da escrita do artigo) - Apesar dos estudos mostrarem que 52% da área poderia ser reconectada com apenas 1,6% de impacto econômico, não houve remoção devido a concessões, custos elevados e usos múltiplos da água.
Pontuar e Classificar (Scoring and Ranking)	Multicritério		Identificar barragens candidatas à remoção com base em externalidades positivas e negativas (mortalidade de peixes, temperatura, segurança)	
Conhecimento Local (Local Knowledge)	Multicritério	Rio Sélune (França)	Remoção das barragens de Vezin e La Roche Qui Boit para restauração da migração de salmões e enguias (exigência da União Europeia)	**Remoção concluída (2023)** - Mesmo com oposição da população as barragens foram removidas. Resultados: retorno de peixes migratórios no primeiro ano, melhora da qualidade da água e redução de sedimentos.
Resposta a Questionamentos ou Falhas	Sem método formal (decisão reativa)	Rio Klamath (EUA)	Conflitos socioambientais entre agricultores e povos indígenas + custo elevado para renovação de licenças	**Remoção concluída (2024) -** Maior projeto de remoção de barragens dos EUA: 4 barragens removidas, 650 km de rio reconectados. Custo final ficou em cerca de US$ 450 milhões.
		Barragem do Cipó – Rio Ipojuca – Caruaru - PE	Cumprimento de legislação + Riscos estruturais	**Remoção em Andamento (2026) –** Barragem do Cipó que está sendo descaracterizada por riscos estruturais apesar da forte oposição da comunidade local.
Decisão institucional / Planejamento de concessão	Não se enquadra nos métodos principais	Rio Romanche (França)	Obsolescência, riscos geológicos (barragem de Séchilienne de 1917) e estudo da EDF para renovação de concessões (mais vantajoso remover e ampliar potência)	**Remoções concluídas (2023) -** 6 barragens foram removidas. Nova usina com 97 MW (40% superior ao arranjo anterior).

A análise dos múltiplos estudos de caso e metodologias deixa claro que a remoção de barragens é um tema complexo, envolve múltiplos decisores e pode ter motivações ambientais, econômicas, sociais, bem como envolver o conflito entre diferentes grupos quanto ao uso da água, como é o caso das barragens do Klamath.

As questões técnicas e econômicas predominaram nas remoções das barragens no rio Romanche, enquanto no Sélune o que preponderou foram as questões ecológicas, e nesse caso as remoções ocorreram de forma contrária a vontade da população que vivia no entorno dessas estruturas. No caso das barragens do rio Klamath foram fatores decisivos para a remoção os conflitos entre povos originários e agricultores, além dos elevados custos para o relicenciamento.

Na bacia do Willamette onde ocorreram diversos estudos sobre a remoção, levantamento de *trade-offs* (análise econômica e ambiental) seguindo tanto métodos multicritério como multiobjetivos não ocorreu nenhuma remoção de estruturas. Isso se deu principalmente devido há concessões vigentes e aos usos múltiplos da água que tem se sobreposto as questões ecológicas até o momento.

O caso da barragem do Cipó mostra que mesmo quando a remoção ocorre por meio de reposta a questões estruturais e decisões judiciais, ocorre forte oposição das populações locais que se sentem prejudicadas pela perda dos outros usos que fazem da água, o que demonstra a necessidade de estudar medidas para reduzir os danos causados a essas populações com o fim desses reservatórios.

No caso brasileiro a legislação coloca como responsabilidade do empreendedor a remoção, descomissionamento ou descaracterização da estrutura ao fim da atividade econômica. Isso se aplica tanto a barragens de rejeito como a barragens de armazenamento de água. No caso das barragens que armazenam água, ocorre em geral oposição da comunidade local às remoções assim como em outros locais do mundo devido aos outros usos que essas populações fazem dos lagos gerados por esses barramentos.

Os casos analisados também deixam claro que embora a legislação fale sobre as remoções ou descaracterizações faltam diretrizes específicas sobre o planejamento e financiamento desse tipo de intervenção. A falta de diretrizes para essas intervenções e mecanismos para apoiar as comunidades afetadas pela ausência dos usos múltiplos desses reservatórios são fatores que dificultam esse tipo de tomada de decisão.

Conclui-se que a remoção de barragens é uma decisão complexa que envolve a combinação de análises técnicas robustas e precisa necessariamente envolver as comunidades afetadas pelos projetos de maneira que os *trade-offs* levantados possam ser discutidos e negociados com o intuito de causar menos impactos sociais e gerar o máximo de benefícios ambientais com menores impactos econômicos. Entende-se que é necessário definir melhor as condições em que devem ocorrer essas remoções em especial quando forem de interesse público e a metodologia de financiamento das obras e compensações financeiras das comunidades e empreendedores que fazem o uso das instalações.

5. PALAVRAS-CHAVE

Análise de portfólio, gestão integrada de recursos hídricos, métodos para tomada de decisões

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] World FIsh Migration Foundation, “DAM REMOVAL PROGRESS 2023,” *DAM REMOVAL EUROPE*, 2023.

[2] Z. Boucher and P. F. Hudson, “Troubled waters: Riparian ecosystem services and community opposition to the largest dam removal project in Europe, Vezins Dam, France,” *Geoforum*, vol. 147, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.geoforum.2023.103906.

[3] M. Habel *et al.*, “Dam and reservoir removal projects: a mix of social-ecological trends and cost-cutting attitudes,” *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-76158-3.

[4] A. G. C. Lejon, B. M. Renöfält, and C. Nilsson, “Conflicts Associated with Dam Removal in Sweden,” 2009. [Online]. Available: https://www.jstor.org/stable/26268322

[5] M. J. Kuby, W. F. Fagan, C. S. ReVelle, and W. L. Graf, “A multiobjective optimization model for dam removal: An example trading off salmon passage with hydropower and water storage in the Willamette basin,” *Adv. Water Resour.*, vol. 28, no. 8, pp. 845–855, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.advwatres.2004.12.015.

[6] S. King and J. R. O’Hanley, “Optimal Fish Passage Barrier Removal-Revisited,” *River Res. Appl.*, vol. 32, no. 3, pp. 418–428, Mar. 2014, doi: 10.1002/rra.2859.

[7] T. M. Neeson, M. C. Ferris, M. W. Diebel, P. J. Doran, J. R. O’Hanley, and P. B. McIntyre, “Enhancing ecosystem restoration efficiency through spatial and temporal coordination,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 112, no. 19, pp. 6236–6241, May 2015, doi: 10.1073/pnas.1423812112.

[8] H. Mader and C. Maier, “A method for prioritizing the reestablishment of river continuity in Austrian rivers,” *Hydrobiologia*, vol. 609, no. 1, pp. 277–288, 2008, doi: 10.1007/s10750-008-9406-0.

[9] K. M. Hoenke, M. Kumar, and L. Batt, “A GIS based approach for prioritizing dams for potential removal,” *Ecol. Eng.*, vol. 64, pp. 27–36, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.12.009.

[10] S. K. McKay, E. H. Martin, P. B. McIntyre, A. W. Milt, A. T. Moody, and T. M. Neeson, “A comparison of approaches for prioritizing removal and repair of barriers to stream connectivity,” *River Res. Appl.*, vol. 36, no. 8, pp. 1754–1761, Oct. 2020, doi: 10.1002/rra.3684.

[11] ERN, “ÉTUDE DE CAS SUR LA MOYENNE ROMANCHE RESTAURATION ECOLOGIQUE DE LA VALLEE,” Jun. 2025.

[12] M.-A. Germaine and L. Lespez, “The Failure of the Largest Project to Dismantle Hydroelectric Dams in Europe? (Sélune River, France, 2009-2017),” Paris, Aug. 2017. [Online]. Available: www.water-alternatives.org

[13] KRRC, “Klamath River Renewal Project,” Klamath River Renewal Project.

[14] H. Gosnell and E. C. Kelly, “Peace on the River? Social-Ecological Restoration and Large Dam Removal in the Klamath Basin, USA.” [Online]. Available: www.water-alternatives.org

[15] H. Gosnell and E. Kelly, “Peace on the River? Social-Ecological Restoration and Large Dam Removal in the Klamath Basin, USA,” *Water Alternatives*, vol. 3, Oct. 2010.

[16] Brasil, “LEI Nº 14.066, DE 30 DE SETEMBRO DE 2020.” Accessed: Oct. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm

[17] G1, “Barragem do Cipó em Caruaru será demolida após risco de colapso,” https://g1.globo.com/pe/caruaru-regiao/noticia/2026/04/13/barragem-do-cipo-em-caruaru-sera-demolida-apos-estudos-apontarem-alto-risco-estrutural.ghtml.

[18] MPPE, “Procuradoria do Município apresenta ao MPPE projeto para a Barragem do Cipó,” https://portal.mppe.mp.br/w/procuradoria-do-munic%C3%ADpio-apresenta-ao-mppe-projeto-para-a-barragem-do-cip%C3%B3.

[19] Tony Schick, “Hydroelectric dams on Oregon’s Willamette River kill salmon. Congress says it’s time to consider shutting them down,” Science & Environment.

[20] A. Nagel, “Analyzing Dam Feasibility in the Willamette River Watershed,” Portland, OR, Jan. 2017. doi: 10.15760/etd.5896.

FOTO 3x4	**Cecília MACHADO** Graduada em Engenharia de Produção Civil pelo CEFET-MG, mestre em Engenharia Civil com ênfase em Hidráulica pelo CEFET-MG (2026). Engenheira de Segurança de Barragens pela CEMIG desde 2024.
	Diego BALBI Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (2000) e mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (2008). Desde 2002 atua na área de Segurança de Barragens e manutenção civil.

	Hersília SANTOS Engenheira civil (UFMG, 2002), mestre (2004) e doutora (2007) em Saneamento e Recursos Hídricos pela UFMG, com pós-doutorado pela University of Iowa (2014). Professora do CEFET-MG desde 2007, coordena o Grupo de Pesquisa em Ecohidráulica (GAEA). Foi coordenadora (2015-2020) e é coordenadora adjunta (2021-) do PPG em Engenharia Civil.
FOTO 3x4	**Elisangela MARTINS DE SA** Professora adjunta do CEFET-MG com doutorado em engenharia de produção na área de concentração otimização de sistemas logísticos e de grande porte pela UFMG (2015), mestrado em Engenharia de Produção na área de concentração produção e logística pela UFMG (2011) e bacharelado em Matemática Computacional pela UFMG (2008).
	Rogério AZEVEDO Engenheiro eletricista (UFMG, 1984), mestre (2009) e doutor (2013) em Engenharia Civil pela UFSC, com ênfase em avaliação de desempenho e gerenciamento de riscos na construção civil. Professor Titular do CEFET-MG, atuando na graduação e no PPG em Engenharia Civil.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

RESPOSTAS ECOLÓGICAS À IMPLANTAÇÃO DE RESERVATÓRIO DE HIDRELÉTRICA: ANÁLISE DE LONGO PRAZO (1997–2024) NO RIO PIRACICABA (MG, BRASIL)

Stella Pereira PACHECO
Biólogo - Flumen Consultoria em Águas Continentais

Izabela Cristina Dias VAZ
Biólogo - Flumen Consultoria em Águas Continentais

Manoela Cristina MORAIS
Biólogo - Flumen Consultoria em Águas Continentais

Sandra Francischetti ROCHA
Biólogo - Flumen Consultoria em Águas Continentais

Sônia Santos BAUMGRATZ
Geógrafa - Ecodinâmica Consultores Associados Ltda

RESUMO

Iniciado em 1995, desenvolvido no âmbito dos licenciamentos ambientais, integrado ao SGA ISO 14001 desde 1999, monitoramento avalia as alterações nas biocenoses aquáticas no reservatório e no Trecho de Vazão Reduzida (TVR). As campanhas trimestrais propiciam análises dos fitoplâncton, perifíton, zooplâncton e macroinvertebrados em quatro pontos através de atributos como riqueza, densidade, diversidade (H') e índices específicos (BMWP e ASPT). Os resultados mostram que o reservatório beneficia as comunidades planctônicas, enquanto o TVR favorece os macroinvertebrados bentônicos. Historicamente, o pós-enchimento (1998–1999) registrou enriquecimento orgânico temporário e transição para o sistema lêntico. Dados recentes (2021/2024) revelam aumento de atributos para zooplâncton e macroinvertebrados, mas redução na equitabilidade e densidade do fitoplâncton. Destaca-se a bioinvasão consolidada do bivalve Corbicula fluminea, potencial simplificador bentônico, embora haja ausência de florações de cianobactérias e de vetores sanitários (Biomphalaria sp.). As alterações concentram-se no reservatório e início do TVR, atenuando-se a jusante, o que reforça o papel do monitoramento na gestão adaptativa e na Educação Ambiental.

ABSTRACT

Initiated in 1995 and integrated into EMS ISO 14001 Environmental Management System (EMS) since 1999, this monitoring program assesses alterations in aquatic biocenoses induced by the reservoir and the Reduced Flow Stretch (RFS). Quarterly sampling campaigns facilitate the analysis of phytoplankton, periphyton, zooplankton, and macroinvertebrates across four stations, utilizing metrics such as richness, density, diversity (H'), and specific biotic indices (BMWP and ASPT).

Results indicate that the reservoir promotes planktonic communities, whereas the RFS favors benthic macroinvertebrates. Historically, the post-filling period (1998–1999) recorded temporary organic enrichment and a transition toward a lentic system. Recent data (2021–2024) reveal an increase in zooplankton and macroinvertebrate attributes, contrasted by a reduction in phytoplankton evenness and density. Notably, the consolidated bioinvasion of the bivalve Corbicula fluminea represents a potential benthic simplifier; however, there is a documented absence of cyanobacterial blooms and sanitary vectors (Biomphalaria sp.). The observed alterations are concentrated within the reservoir and the initial reach of the RFS, attenuating downstream. This reinforces the pivotal role of long-term monitoring in adaptive management and Environmental Education.

1. INTRODUÇÃO

A análise das respostas dos organismos aquáticos às alterações físico-químicas do ambiente constitui uma importante ferramenta para avaliação da qualidade ambiental de ecossistemas aquáticos [1]. Nesse contexto, o uso de respostas biológicas como ferramentas indicadoras de degradação ambiental e/ou de alterações nas condições naturais apresenta caráter complementar às análises físico-químicas, uma vez que a composição e a estrutura das comunidades refletem não apenas as condições momentâneas no ato da amostragem, mas também os efeitos cumulativos dos estímulos ao longo do tempo [2] e [3].

Em ambientes aquáticos, as **algas** que compõem o **fitoplâncton e o perifíton** constituem um grupo diverso e polifilético de organismos fotossintetizantes, desempenhando papel central como produtores primários. A **comunidade zooplanctônica**, por sua vez, é composta majoritariamente por consumidores que exploram tanto os produtores quanto os decompositores, incluindo protozoários que se alimentam de bactérias e fungos, principais agentes da degradação da matéria orgânica. Já a **fauna bentônica** é predominantemente detritívora, atuando na filtragem de detritos e matéria orgânica em suspensão ou na ingestão de sedimentos. Dessa forma, o monitoramento integrado dessas comunidades é essencial para a manutenção da integridade ecológica e das condições trófico-dinâmicas do rio Piracicaba sob influência da Usina.

Considerando que os ecossistemas aquáticos estão sujeitos a múltiplas perturbações, de origem natural ou antrópica, a biota responde a esses estímulos por meio de alterações mensuráveis em nível individual, populacional ou comunitário. O conceito de “resposta biológica” refere-se, portanto, ao conjunto dessas reações frente a um ou mais estímulos ambientais [4], sendo estes definidos como quaisquer fatores capazes de induzir mudanças detectáveis na estrutura ou funcionamento das comunidades.

Adicionalmente à abordagem de bioindicação, a legislação ambiental brasileira estabelece a necessidade de compreensão dos processos ecológicos associados à biota aquática. A Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 01/2008 [5] determina que a qualidade da água deve garantir simultaneamente a proteção da saúde humana e a manutenção do equilíbrio ecológico, estabelecendo que corpos hídricos enquadrados até a classe 2, como o rio Piracicaba em Minas Gerais, assegurem a conservação das comunidades aquáticas.

Nesse contexto, o monitoramento das comunidades hidrobiológicas na área de influência da Usina Hidrelétrica Guilman-Amorim, no rio Piracicaba (MG), foi definido ainda na fase de viabilidade do empreendimento para que se iniciasse a estruturação de uma *baseline* das condições do rio. O programa tem como objetivo avaliar as variações na composição, estrutura e dinâmica das biocenoses aquáticas em resposta às alterações morfoambientais decorrentes da formação do reservatório e da manutenção do trecho de vazão residual (TVR).

O escopo do monitoramento passou por adequações ao longo das diferentes fases do empreendimento. As campanhas de coleta tiveram início entre 1995 e 1996 e se estenderam até agosto de 1997, durante a fase de implantação da usina, período em

que foram monitorados os pontos fluviais GA1 e GA2, localizados no rio Piracicaba no que posteriormente de configurou o TVR.

Após o enchimento do reservatório, ocorrido em setembro de 1997, e ao longo de 1998, correspondente ao início da operação da usina, os pontos GA1 e GA2 foram mantidos como representativos do trecho de vazão reduzida. Nesse período, foi incorporado à malha amostral o ponto GA3, representativo do trecho do rio Piracicaba sob influência direta do represamento pela barragem. Em fevereiro de 1999, foi incluído o ponto GA4, característico da zona de remanso do reservatório, com influência direta do trecho fluvial do rio Piracicaba. Desde então, o monitoramento passou a contemplar de forma contínua os pontos GA1, GA2, GA3 e GA4.

A presente compilação tem como objetivo resgatar e integrar o conhecimento científico produzido desde a fase pós-enchimento até os dias atuais, por meio da construção de um panorama abrangente dos principais atributos ecológicos das comunidades monitoradas. Para isso, foram integrados dados de fitoplâncton, perifíton, zooplâncton e macroinvertebrados bentônicos, abrangendo tanto o ciclo recente de monitoramento (2016–2024) quanto a série histórica iniciada em 1997.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

A Usina Hidrelétrica Guilman-Amorim (140MW) localiza-se no rio Piracicaba, entre os municípios de Nova Era e Antônio Dias em Minas Gerais - Brasil, em operação plena desde 1998. A bacia do rio Piracicaba (5.453,77 km2) importante afluente da margem esquerda do rio Doce, corresponde a 7% da área de drenagem da bacia do rio Doce (Figura 1).

O monitoramento avalia as comunidades aquáticas em quatro pontos distribuídos longitudinalmente no rio Piracicaba: montante (GA-04), reservatório (GA-03), Trecho de Vazão Reduzida – TVR (GA-01) e jusante após o último afluente do TVR (GA-02).

Características Geomorfológicas

O vale do rio Piracicaba e seus principais afluentes no trecho onde está instalada a hidrelétrica tem forte condicionamento morfoestrutural, o que se reflete na conformação da curva acentuada ocupada pelo reservatório (“meandro encaixado”) limitado por vertentes retilíneas e em grande parte recoberta por vegetação de porte arbóreo. Também no trecho de jusante, predominantemente retilíneo e que corresponde ao Trecho de Vazão Reduzida (TVR), com 9 km entre o reservatório e o canal de fuga, apresenta-se com leito rochoso, onde ocorrem inúmeras marmitas de turbilhonamento, barras rochosas fraturadas que condicionam a deposição dos sedimentos, formando corredeiras e remansos e as margens com grandes blocos rochosos. São incipientes as faixas de planícies e terraços fluviais, sendo esses últimos predominantemente recobertos por rampas de colúvios. Destaca-se que os quatro afluentes do rio Piracicaba, neste trecho do TVR, apresentam foz em desníveis que se constituem em queda d’água e/ou corredeiras, o que influencia na aeração da água que chega à calha principal, conforme apresentado na Figura 1. Essa compartimentação geomorfológica condiciona a heterogeneidade dos habitats aquáticos.

A área de propriedade do Consórcio (1.179,7 ha), inserida no Bioma da Mata Atlântica, é ocupada (60%) por áreas de preservação permanente, incluindo uma RPPN (253,5ha), que se estendem ao longo do rio e no entorno do reservatório.

O regime hidrológico é tipicamente tropical, com precipitações concentradas entre outubro e março e estação seca no inverno. A variação dos volumes totais anuais registra valores entre 2000mm e 1200mm. A sazonalidade da vazão influencia diretamente a dinâmica fluvial e a operação da usina que se caracteriza a fio d'água.

No rio Piracicaba, estão refletidos os efeitos dos usos da água e a ocupação do solo da bacia hidrográfica, quais sejam, a intensa atividade minerária (minério de ferro, garimpo fluvial, desde o período colonial); atividades industriais, os reflorestamentos comerciais, pecuária extensiva e os parcelamentos dos solos urbanos e obras de infraestrutura.

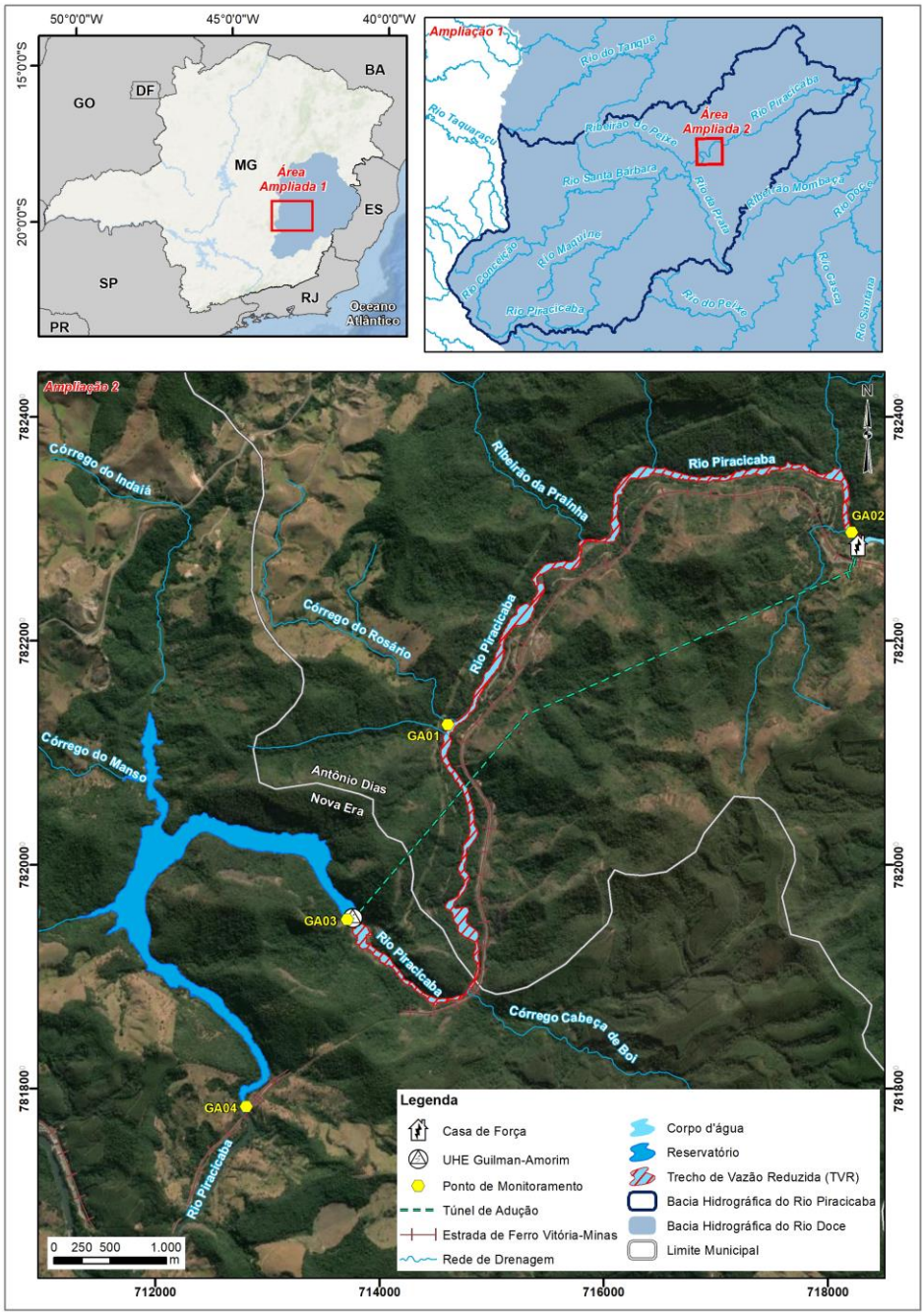


Figura 1 – Rede de amostragem do Monitoramento das Comunidades Aquáticas na área de inserção da UHE Guilman Amorim (GA1=TVR1; GA2=TVR2; GA3=Reservatório; GA4=Montante).

2.2 Coleta e Análise

Os dados gerados e analisados neste trabalho provem dos estudos desenvolvidos no âmbito dos licenciamentos ambientais, sendo, portanto, apresentados ao órgão responsável pelo licenciamento em Minas Gerais, desde a fase inicial desse empreendimento. [6] e [7]

As campanhas ocorrem, initerruptamente trimestralmente, contemplando períodos principais do ciclo hidrológico anual, seco, chuvoso e intermediários considerando o regime pluviométrico regional. Os procedimentos de coleta, preservação e análise

seguiram as diretrizes estabelecidas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewate*r – 24ª Edição [8]. A identificação taxonômica foi realizada até o menor nível possível. No âmbito do monitoramento da malacofauna foram realizadas buscas ativas nos pontos da malha amostral.

Foram avaliados os atributos ecológicos de Diversidade de Shannon-Wiener (H'), Riqueza de Táxons (S) e Densidade Total, para as comunidades de fitoplâncton, zooplâncton e macroinvertebrados aquáticos, além da riqueza para a comunidade de perifiton e o índice BMWP e ASPT para os macroinvertebrados.

2.3 Tratamento de dados

Para a avaliação dos atributos ecológicos das comunidades aquáticas (fitoplâncton, zooplâncton e macroinvertebrados bentônicos), foram considerados os descritores riqueza de táxons, diversidade de Shannon-Wiener (H') e densidade de organismos. Para a comunidade perifítica, foi considerada apenas a riqueza de táxons.

As análises foram realizadas no ambiente computacional (R) [9]. Para atender aos pressupostos de normalidade dos resíduos e homogeneidade de variâncias exigidos pelas análises paramétricas, os dados de densidade foram submetidos à transformação logarítmica ($\log_{10}(x + 1)$).

As diferenças espaciais nos parâmetros bióticos entre os pontos de amostragem (GA1, GA2, GA3 e GA4) foram avaliadas por meio de Análise de Variância (ANOVA) de uma via, considerando os pontos como fator fixo. Quando identificadas diferenças significativas ($p < 0,05$), aplicou-se o teste de comparações múltiplas de Tukey (post hoc) para identificar os pares de pontos com diferenças estatisticamente significativas.

Os resultados foram representados por meio de gráficos do tipo boxplot, contendo mediana, quartis e valores extremos. As letras indicativas acima dos grupos representam os resultados das comparações múltiplas: grupos que compartilham ao menos uma letra não diferem significativamente entre si ($p > 0,05$). A interpretação das diferenças entre os pontos considerou a concordância entre o teste global (ANOVA) e as comparações múltiplas.

A análise da variação temporal de riqueza de táxons, diversidade de Shannon-Wiener (H') e densidade de organismos das comunidades aquáticas foi conduzida a partir de uma série histórica anual compreendendo o período de 2016 a 2024, para os quatro pontos amostrais (GA1, GA2, GA3 e GA4). Inicialmente, os dados foram organizados em séries temporais, considerando os atributos ecológicos como variável resposta e o tempo (anos) como variável independente, permitindo a avaliação de padrões de variação ao longo do período monitorado.

Para cada ponto, foi ajustado um modelo de regressão linear simples, no qual a linha de tendência foi obtida por meio do método dos mínimos quadrados, visando identificar a direção e magnitude das mudanças temporais. A inclinação da reta (coeficiente angular) foi utilizada como indicador da tendência, sendo valores positivos interpretados como tendência de aumento do atributo ao longo do tempo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pós-enchimento – 1997 a 2015

A formação do reservatório em 1997 (GA3) promoveu alterações estruturais significativas nas comunidades aquáticas, refletindo a transição de um sistema lótico para lêntico e seus efeitos ao longo do gradiente longitudinal. No período imediatamente posterior ao enchimento (1998–1999), a comunidade fitoplanctônica apresentou aumento expressivo de densidade no reservatório, com predominância de formas flageladas, como clorofíceas e dinoflagelados e de cianobactérias, indicando condições iniciais de enriquecimento orgânico e tendência à eutrofização. Esse processo foi acompanhado pela substituição de diatomáceas típicas de ambientes lóticos por espécies com maior capacidade de flutuabilidade. Nos trechos de vazão reduzida (GA1 e GA2), os padrões temporais refletiram parcialmente a dinâmica do reservatório, evidenciando influência a jusante, enquanto o trecho de montante (GA4) apresentou menor sensibilidade. A riqueza fitoplanctônica registrou picos relevantes no período inicial e em eventos posteriores, indicando reorganização da comunidade.

A comunidade zooplanctônica, por sua vez, apresentou baixa resposta inicial ao enchimento, com incremento mais evidente apenas a partir de 2006, quando foram registrados picos expressivos de densidade no reservatório, especialmente entre 2008 e 2011. Observou-se alternância na dominância entre rotíferos e crustáceos, padrão característico de ambientes lênticos, com reflexos mais pronunciados em GA1 do que em GA2, sugerindo influência espacial diferenciada ao longo do trecho a jusante determinada pela afluência de tributários entre os dois pontos de coleta.

No que se refere aos macroinvertebrados bentônicos, verificou-se elevada abundância ao longo de toda a série histórica, com predomínio de oligoquetas nos picos registrados no reservatório após sua formação, indicando condições associadas ao acúmulo de matéria orgânica. Nos trechos de vazão reduzida, manteve-se a predominância de quironomídeos, evidenciando maior estabilidade da condição fluvial, embora com aumento transitório da riqueza nos primeiros anos após o enchimento, seguido de tendência de retorno a condições prévias. Destaca-se a presença consolidada do bivalve exótico *Corbicula fluminea*, potencial agente de simplificação das biocenoses bentônicas. Os registros de ocorrência de *Biomphalaria* sp. foram sempre esporádicos, pontuais e em baixa densidade.

Por fim, a comunidade perifítica apresentou variações inicialmente discretas, mas a partir de 2007 passou a registrar picos mais acentuados no período seco em todos os pontos de amostragem. Observou-se maior riqueza nos trechos de vazão reduzida (GA1 e GA2), enquanto o reservatório e o montante apresentaram incrementos mais moderados. A composição taxonômica manteve-se relativamente estável ao longo do tempo, indicando adaptação das espécies às novas condições hidrológicas impostas pelo represamento. Em conjunto, os resultados evidenciam que o enchimento do reservatório induziu um processo inicial de reorganização ecológica, com sinais de eutrofização e mudanças na estrutura funcional das comunidades, seguido por uma tendência de estabilização ao longo dos anos, com influência espacial decrescente no sentido montante-jusante.

Variação espacial atributos ecológicos série histórica – 2016 a 2024

A análise de variância (ANOVA) revelou que a estrutura das comunidades aquáticas permaneceu predominantemente estável ao longo dos pontos amostrais, com exceções significativas registradas para a riqueza do zooplâncton ($F_{3, 106} = 3,05$; $p < 0,05$) e para a densidade de macroinvertebrados ($F3, 91 = 3,22$; $p < 0,05$) (Figura 2). Embora a ANOVA tenha indicado diferença significativa entre os pontos, o teste de comparações múltiplas de Tukey não identificou diferenças entre pares específicos. Esse resultado pode ser atribuído à presença de variações sutis e distribuídas ao longo do gradiente espacial, associadas à elevada variabilidade intragrupo e ao caráter mais conservador do teste post hoc. Assim, a heterogeneidade detectada pela ANOVA reflete um padrão gradual de variação, sem contrastes marcantes entre pontos específicos.

A sobreposição das letras de significância reforça essa interpretação, indicando que o trecho monitorado se comporta como um contínuo ecológico, no qual as mudanças na estrutura da comunidade zooplanctônica ocorrem de forma gradual, sem descontinuidades marcantes ou isolamento ecológico entre os pontos amostrais.

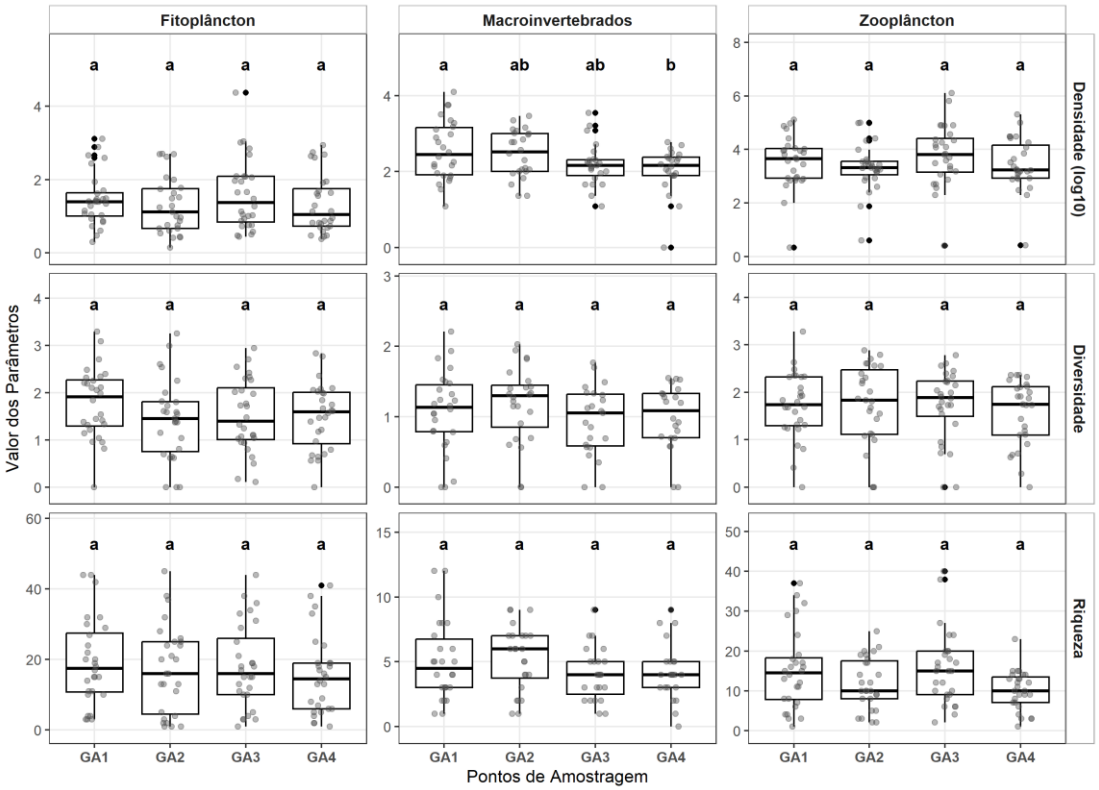


Figura 2 –Variação espacial dos parâmetros ecológicos (densidade, diversidade e riqueza) das comunidades de fitoplâncton, zooplâncton e macroinvertebrados nos pontos de amostragem (GA1=TVR1; GA2=TVR2; GA3=Reservatório; GA4=Montante) no período de 2016 a 2024.

Esse resultado reflete a elevada dinâmica espacial da comunidade zooplanctônica. Por se tratar de organismos predominantemente transportados pela corrente, variações na riqueza podem ocorrer em resposta a micro-habitats, zonas de remanso e gradientes hidráulicos locais ao longo do trecho [10] e [11].

Ainda assim, observa-se uma tendência de maiores valores de riqueza nos pontos situados no trecho de vazão reduzida (GA1 – TVR1 e GA2 – TVR2) e no reservatório (GA3), em comparação ao ponto a montante (GA4), que apresentou, em geral, menores valores. Esse padrão pode estar associado às diferenças nas condições ambientais entre os trechos, como maior estabilidade hidrológica e maior tempo de residência da água em ambientes lênticos e de vazão reduzida, favorecendo o estabelecimento de uma maior riqueza zooplanctônica.

Em Tucuruí-PA, estudos indicaram que a precipitação e o gradiente espacial do reservatório exerceram maior influência sobre a distribuição dos organismos do que variáveis ambientais isoladas [12]. A predominância de rotíferos, observada nos dois reservatórios, também evidencia a capacidade desse grupo em responder rapidamente às alterações ambientais decorrentes do barramento, característica comum em ecossistemas tropicais submetidos à regulação hidrológica.

Diferente do padrão de homogeneidade espacial observado para a comunidade fitoplanctônica, a densidade de macroinvertebrados bentônicos apresentou variação espacial estatisticamente significativa ao longo do trecho amostrado. Esse resultado reflete diretamente a ecologia e o modo de vida desses organismos. Por serem predominantemente sésseis ou apresentarem baixa mobilidade, além de viverem diretamente associados ao substrato, os macroinvertebrados são altamente responsivos a gradientes e pressões ambientais de caráter local. Flutuações na densidade dessa comunidade entre os pontos sugerem a existência de variações na estrutura física do habitat, tais como o tipo de substrato, velocidade da correnteza, profundidade, ou até mesmo aportes pontuais de matéria orgânica que favorecem o desenvolvimento de grupos tolerantes ou limitam os mais sensíveis.

A sensibilidade desses organismos bentônicos os consolida como excelentes bioindicadores de qualidade ambiental. A variação na abundância total de indivíduos sem uma alteração correspondente na riqueza de táxons ($p = 0,247$) indica que, embora os mesmos táxons colonizem os diferentes pontos do trecho, as condições de habitat em determinados pontos favorecem taxas reprodutivas e de sobrevivência marcadamente superiores, resultando em picos de densidade localizados.

A variação espacial na densidade de macroinvertebrados bentônicos ($p = 0,0263$) reflete diretamente o gradiente físico e hidrodinâmico imposto pelo barramento do Rio Piracicaba. A transição entre o trecho fluvial a montante (GA-04), o ambiente lêntico do reservatório (GA-03) e os pontos fluviais regulados a jusante da barragem (GA-01 e GA-02) impõe modificações na velocidade da correnteza e na dinâmica de deposição de sedimentos. A retenção de sedimentos finos e o acúmulo de matéria orgânica no reservatório (GA-03) alteram a estrutura do habitat bentônico em comparação com os trechos fluviais de jusante, impactando a capacidade de suporte e a densidade das populações associadas.

De forma análoga, a heterogeneidade espacial detectada pela ANOVA para a riqueza do zooplâncton ($p = 0,032$) responde ao gradiente longitudinal de tempo de residência da água. Ambientes com fluxo reduzido, como o reservatório (GA-03), atuam como zonas de incubação que favorecem o desenvolvimento das populações planctônicas. No entanto, o fluxo contínuo e a exportação mecânica de propágulos e organismos da represa para os trechos de jusante (GA-01 e GA-02) promovem uma homogeneização biológica parcial ao longo do canal.

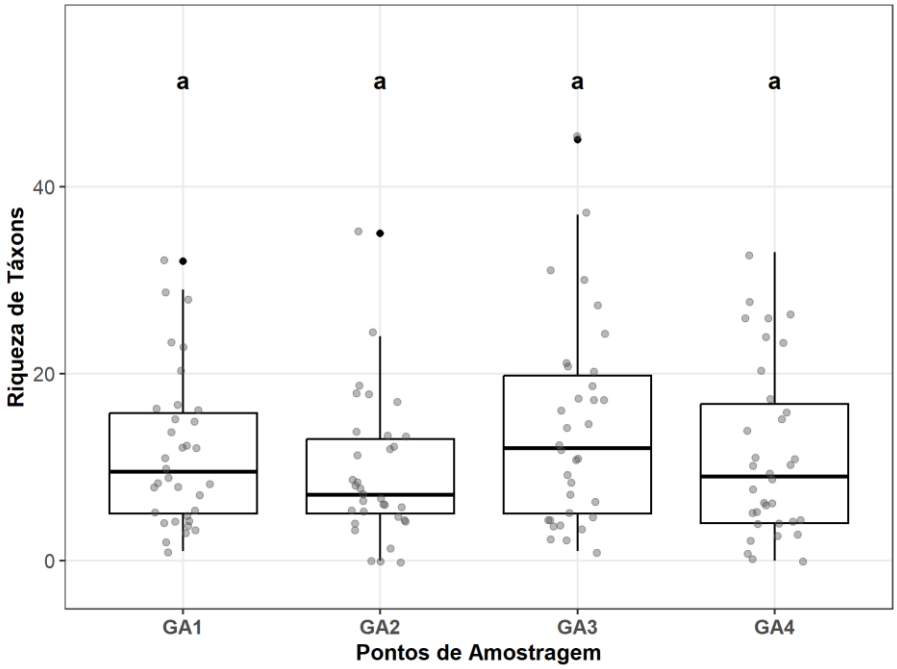


Figura 3 – Variação espacial da comunidade perifítica (GA1=TVR1; GA2=TVR2; GA3=Reservatório; GA4=Montante) no período de 2016 a 2024.

A riqueza de táxons da comunidade de perifíton não apresentou variações espaciais estatisticamente significativas entre os pontos amostrais analisados ($F_{3;\ 131}$ = 1,60; p = 0,194) (Figura 3). Esse padrão sugere uma homogeneidade na distribuição e no estabelecimento dessa comunidade ao longo do trecho monitorado.

A homogeneidade espacial da riqueza perifítica sugere que, apesar das variações hidráulicas e geomorfológicas entre o reservatório e o TVR, os fatores determinantes para a colonização, como a oferta de substrato e a disponibilidade de luz, apresentam-se de forma equitativa no trecho. Esse padrão é frequentemente observado em sistemas onde a deriva algal atua como um vetor de homogeneização, transportando propágulos entre as estações e mantendo a similaridade taxonômica [13]. Além disso, a estabilidade desses resultados indica que as alterações no regime de vazão no TVR não foram suficientes para criar nichos excludentes, permitindo a persistência de uma comunidade resiliente ao longo do gradiente longitudinal.

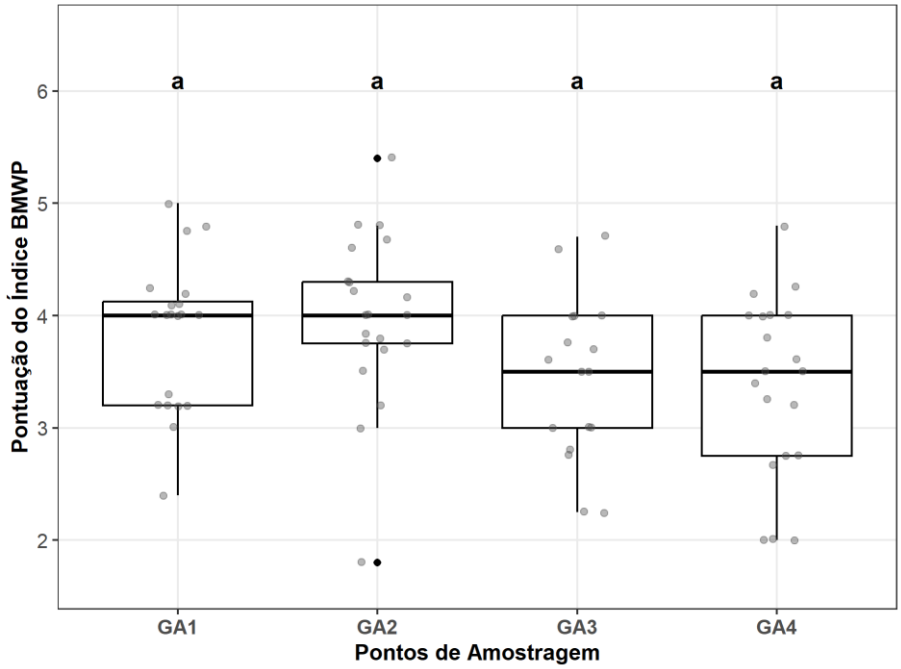


Figura 4 – Variação espacial do índice BMWP/ASPT da comunidade de macroinvertebrados bentônicos nos pontos de amostragem (GA1=TVR1; GA2=TVR2; GA3=Reservatório; GA4=Montante) no período de 2016 a 2024.

A variação significativa indicada pela ANOVA global para o índice BMWP (p = 0,030) revela que a estrutura taxonômica e a sensibilidade ecológica da comunidade de macroinvertebrados respondem ao gradiente longitudinal do rio. Sob a perspectiva ecológica, a ausência de separação nítida de grupos pelo teste de Tukey indica que, embora ocorram flutuações nas pontuações do índice, o sistema funciona como um contínuo ecológico (Figura 4). A transição entre o trecho fluvial a montante (GA4), o ambiente lêntico do reservatório (GA3) e os trechos de jusante regulados pela barragem (GA1 e GA2) ocorre de forma gradual.

Essa homogeneidade parcial na qualidade da água sugere que as pressões ambientais exercidas pelo barramento (como a alteração do fluxo e deposição de sedimentos) afetam de maneira mais drástica a densidade absoluta dos organismos (abundância) do que a composição geral de famílias de macroinvertebrados (qualidade/sensibilidade refletida no BMWP). Assim, a integridade biótica e a capacidade de suporte ecológica do rio Piracicaba mantêm-se em níveis equivalentes e estáveis ao longo de todo o trecho monitorado.

Ao longo do período de 2016 a 2024, a malacofauna registrada foi composta predominantemente por gastrópodes, com destaque para *Melanoides* sp. (Thiaridae) e *Biomphalaria* sp. (Planorbidae). Espécies do gênero Melanoides, em especial *M. tuberculata*, são reconhecidas como exóticas e invasoras em ambientes dulcícolas brasileiros, apresentando elevada capacidade de dispersão e potencial de competição com espécies nativas. Por sua vez, *Biomphalaria* sp. possui relevância sanitária, uma vez que inclui espécies hospedeiras intermediárias de *Schistosoma mansoni*, agente etiológico da esquistossomose. No presente estudo, o registro mais recente desse gênero ocorreu em 2020, quando os exemplares foram submetidos à análise de cercárias, não sendo observada infecção.

Os bivalves também apresentaram ampla distribuição ao longo do período amostral, sendo representados principalmente por *Corbicula fluminea* (Corbiculidae), espécie exótica e invasora amplamente disseminada em sistemas aquáticos continentais. Sua presença está associada a elevadas densidades populacionais e a potenciais impactos ecológicos, como alteração da estrutura das comunidades bentônicas e modificação de processos ecossistêmicos.

Análise de Tendência – Variação temporal atributos ecológicos série histórica de 2016 a 2024

A análise temporal dos atributos ecológicos entre 2016 e 2024 evidenciou padrões consistentes de resposta das comunidades ao longo do gradiente longitudinal, diferenciando os trechos de vazão reduzida (GA1 e GA2), o reservatório (GA3) e o trecho de montante (GA4) (Tabela 1). De modo geral, a riqueza do perifíton apresentou tendência de aumento em todos os pontos, indicando maior complexidade estrutural dessa comunidade ao longo do período.

Para o fitoplâncton, observou-se tendência de redução da riqueza em todos os pontos, concomitante ao aumento da diversidade e diminuição da densidade, sugerindo reorganização da comunidade com possível substituição de espécies dominantes por assembléias mais equilibradas. Esse padrão foi consistente tanto nos trechos de vazão reduzida quanto no reservatório e montante, indicando resposta sistêmica ao longo do eixo fluvial.

Os dados apresentados em estudo sobre os efeitos do barramento do trecho médio do rio Tocantins pela implantação da UHE Estreito [14] sobre a comunidade fitoplanctônica, corroboram a tendência de favorecimento de espécies generalistas no período pós-enchimento. A autora destaca, ainda, a relevância dos rios tributários como importantes vetores de entrada de espécies, contribuindo diretamente para a manutenção da biodiversidade nas áreas sob influência do barramento.

A comunidade zooplanctônica apresentou redução na riqueza em todos os pontos, porém com aumento da densidade, além de incremento na diversidade em GA2 e GA4. Esses resultados indicam maior abundância de organismos, ainda que com menor número de táxons, possivelmente refletindo condições ambientais seletivas. No reservatório (GA3), a diversidade não apresentou aumento, sugerindo maior dominância de grupos específicos.

Para os macroinvertebrados bentônicos, verificou-se tendência de redução da densidade em todos os pontos, enquanto a riqueza aumentou em GA3 e GA4 e diminuiu nos trechos de vazão reduzida. A diversidade apresentou incremento apenas no reservatório, indicando que esse compartimento favoreceu maior heterogeneidade da comunidade bentônica. Em conjunto, os resultados evidenciam respostas diferenciadas entre compartimentos, com destaque para o reservatório como área de maior reestruturação ecológica, corroborando a influência de ambientes lênticos sobre os atributos biológicos.

Tabela 1 – Análise das tendências de variação temporal dos parâmetros ecológicos (Riqueza, Diversidade e Densidade) das comunidades de perifiton, fitoplâncton, zooplâncton e macroinvertebrados nos pontos de amostragem (GA1=TVR1; GA2=TVR2; GA3=Reservatório; GA4=Montante) no período de 2016 a 2024.

PONTOS	PERIFITON	FITOPLÂNCTON			ZOOPLÂNCTON			MACROINVERTEBRADOS		
	RIQUEZA	RIQUEZA	DIVERSIDADE	DENSIDADE	RIQUEZA	DIVERSIDADE	DENSIDADE	RIQUEZA	DIVERSIDADE	DENSIDADE
GA1	▲	▼	▲	▼	▼	▼	▲	▼	▼	▼
GA2	▲	▼	▲	▼	▼	▲	▲	▼	▼	▼
GA3	▲	▼	▲	▼	▼	▼	▲	▲	▲	▼
GA4	▲	▼	▲	▼	▼	▲	▲	▲	▼	▼

A interpretação ecológica dos resultados considerou a variabilidade natural dos sistemas aquáticos e a influência de fatores sazonais e hidrológicos sobre as comunidades aquáticas, reconhecendo que séries temporais ambientais podem apresentar flutuações não lineares, ainda que a tendência linear represente uma síntese robusta do comportamento geral do período analisado.

De forma complementar, dados reunidos em uma síntese sobre tendências e padrões de quarenta anos de pesquisas relacionadas à ecologia do fitoplâncton em reservatórios brasileiros, identificaram importantes lacunas de conhecimento e necessidades futuras de investigação [15]. **Entre os principais pontos destacados, ressalta-se a importância de estudos de longa duração, baseados em séries históricas robustas e dados recentes, como forma de ampliar o entendimento da ecologia fitoplanctônica e impulsionar avanços científicos na área.** O estudo também evidenciou um crescimento gradual no número de publicações ao longo das últimas quatro décadas, com maior concentração nos anos de 2018 e 2019. Em relação à distribuição geográfica das pesquisas, o estado de São Paulo concentrou 31% das publicações, seguido por Pernambuco (12%) e Paraná (10%), reforçando a relevância da disponibilização de dados provenientes de reservatórios de Minas Gerais no meio científico.

Esse estudo ainda destaca que um dos principais impactos observados em reservatórios brasileiros corresponde à ocorrência de florações de cianobactérias associadas ao aumento das concentrações de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo [15]. Esse cenário, entretanto, não foi observado até o momento no reservatório da UHE Guilman-Amorim.

Além disso, os resultados obtidos para os macroinvertebrados bentônicos na UHE Guilman-Amorim corroboram com estudos realizados em reservatórios brasileiros, que demonstram forte influência do barramento e da qualidade ambiental sobre a estrutura da comunidade. Assim como observado no reservatório de Volta Grande, entre os municípios de Conceição das Alagoas/MG e Miguelópolis/SP [16], aponta que as alterações ambientais afetaram principalmente a abundância e a distribuição dos organismos, sem mudanças expressivas na composição taxonômica. A maior diversidade registrada no reservatório (GA3) reforça o papel dos ambientes lênticos na promoção de heterogeneidade ecológica.

De maneira semelhante, estudos em reservatórios semiáridos evidenciaram que a perda da qualidade da água reduz riqueza, abundância e diversidade de macroinvertebrados bentônicos, favorecendo organismos tolerantes [17]. Em conjunto, os estudos indicam que barramentos promovem reorganização gradual da

comunidade bentônica, refletindo as alterações do fluxo, deposição de sedimentos e predominância de táxons resistentes.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que o enchimento do reservatório desencadeou um processo inicial de reorganização ecológica, caracterizado por indícios de eutrofização e alterações na estrutura funcional das comunidades aquáticas, fenômeno frequentemente associado a perturbações antrópicas em ecossistemas de água doce. Subsequentemente, observou-se uma tendência de estabilização temporal, atribuída à adaptação das espécies às novas condições hidrológicas impostas pelo represamento. A similaridade dos atributos ecológicos entre as comunidades perifítica, fitoplanctônica, zooplanctônica e de macroinvertebrados bentônicos nos trechos a montante e a jusante da área de influência do reservatório sugere que os impactos ecológicos foram espacialmente limitados, indicando baixa magnitude de perturbação sobre as respostas biológicas avaliadas. Destaca-se, entretanto, a ocorrência consolidada do bivalve exótico (molusco com concha) *Corbicula fluminea*, potencial agente de simplificação estrutural das biocenoses bentônicas. A ausência de florações de cianobactérias e de registros. desde 2020, de molusco vetor, tal como *Biomphalaria* sp. infectado por *Shistosoma mansoni*, indica reduzido risco sanitário no período recente.

Esses achados reforçam a relevância do monitoramento hidrobiológico contínuo como ferramenta fundamental para a gestão ambiental adaptativa e para a consolidação de ações do Programa de Educação Ambiental desenvolvido pela equipe da Usina. Além disso, representam uma primeira iniciativa de compilação e resgate das informações científicas geradas ao longo deste estudo de longa duração, contribuindo para a integração do conhecimento produzido desde as fases iniciais do empreendimento até os dias atuais.

Destaca-se, ainda, a importância da realização de novas sínteses voltadas à avaliação específica de cada comunidade biológica, considerando análises comparativas entre os períodos de pré-enchimento, pós-enchimento e a condição atual do sistema. Abordagens dessa natureza poderão ampliar a compreensão sobre tendências ecológicas de longo prazo e revelar padrões ainda não identificados nos estudos científicos de abrangências espacial e temporal.

5. PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento hidrobiológico; Reservatório usina hidrelétrica; Fitoplâncton, Zooplâncton; Macroinvertebrados aquáticos.

Agradecimentos: Diretoria do Consórcio UHE Guilman Amorim, em especial ao Eng. Roberto Carlos Oliveira de Aragão. Equipe técnica da Ecodinâmica: Geog. Débora A. Alves, Biol. Alison Bramuth Costa e Adm. Katlyn Monção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BUSS, D. F.; OLIVEIRA, R. B.; BAPTISTA, D. F. (2008) – "Monitoramento biológico de ecossistemas aquáticos continentais", Oecologia Brasiliensis, v. 12, n. 3, Brasil.

[2] METCALFE, J. L. (1989) – "Biological water quality assessment of running waters based on macroinvertebrate communities: history and present status in Europe", Environmental Pollution, v. 60, p. 101-139, Inglaterra.

[3] DE PAUW, N.; VANHOOREN, G. (1983) – "Method for biological quality assessment of watercourses in Belgium", Hydrobiologia, v. 100, n. 1, p. 153-168, Bélgica.

[4] ARMITAGE, P. D. (1995) – "Behaviour and ecology of adults", The Chironomidae: Biology and Ecology of Non-Biting Midges, Chapman & Hall, pp. 194-224, Londres.

[5] MINAS GERAIS. (2008) – "Deliberação Normativa conjunta COPAM/CERH nº 01/2008", Diário do Executivo – Minas Gerais, 13/05/2008, Belo Horizonte.

[6] CONSÓRCIO UHE GUILMAN-AMORIM/ECODINÂMICA, J. (1998) – "Monitoramento da Qualidade da Água do Rio Piracicaba (abril/95 a abril/98)", relatório técnico ECO/GA-120 RQA-10/98, Belo Horizonte, Brasil.

[7] CONSÓRCIO UHE GUILMAN-AMORIM/ECODINÂMICA, J. (2009) – "Gestão da Biodiversidade: Plano de Conservação de Espécies de Peixes", relatório técnico ECO/GA-472 RMF-20/2009, 49 p., Belo Horizonte, Brasil.

[8] APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. (2023) – "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", AWWA/WPCH, 24th Edition, Washington.

[9] R CORE TEAM (2026) – "R: A language and environment for statistical computing", R Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria.

[10] REYNOLDS, C. S. (2000) – "Flux and forms: the reasoning and resistance of planktonic terrestrial microorganisms to being erased by the currents", Freshwater Biology, v. 43, n. 3, Reino Unido.

[11] NOGUEIRA, M. G. (2001) – "Zooplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir (Paranapanema River), São Paulo, Brazil", Hydrobiologia, v. 455, p. 1-18, Holanda.

[12] MORAIS, J. V. M. (2020) – "Estrutura Espaço-Temporal da Comunidade Zooplanctônica do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (Pará, Brasil)", Dissertação de Mestrado em Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém.

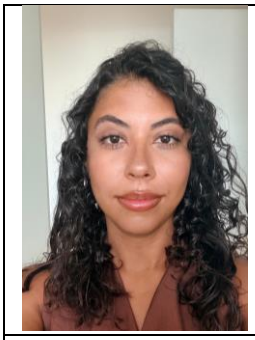
[13] BIGGS, B. J. F. (1996) – "Patterns in benthic algae of streams", Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems, Academic Press, pp. 31-56, San Diego.

[14] DE CASTRO, L. S. (2024) – "Efeito do barramento, sazonalidade e tipo de ambiente sobre o fitoplâncton de reservatórios", Dissertação de Mestrado em Ecologia, Universidade Federal do Pará, Belém.

[15] SILVA, M. J. L. et al. (2025) – “Tendências e padrões em quarenta anos de pesquisas sobre ecologia de fitoplâncton em reservatórios brasileiros”, Dissertação de Mestrado em Conservação e Manejo de Recursos Naturais, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel.

[16] DA SILVA CAMARGO, P. R. et al. (2022) – “Diversidade da comunidade de macroinvertebrados bentônicos no reservatório de Volta Grande, Bacia do Baixo Rio Grande”, Research, Society and Development, v. 11, n. 7, Brasil.

[17] MEDEIROS, C. R. et al. (2024) – “Influência da qualidade da água de reservatórios tropicais semiáridos sobre a diversidade de macroinvertebrados bentônicos”, Anais do XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, p. 1-10, João Pessoa.

	**Stella PACHECO** Bióloga formada pela Universidade do Estado de Minas Gerais (2021) e mestre em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre pela Universidade Federal de Minas Gerais (2023). Atua na avaliação dos impactos do rompimento da barragem e na execução do PAEBM com ênfase em Ecologia Aquática.
	**Izabela VAZ** Bióloga e mestre em Ciências Ambientais com sólida experiência em estudos limnológicos e hidrobiológicos. Possui atuação em projetos dos setores de mineração, energia e indústria, com expertise em análises taxonômicas de zooplâncton, fitoplâncton e cianobactérias, monitoramento ambiental e elaboração de relatórios técnicos.
	**Manoela MORAIS** Especialista em macroinvertebrados aquáticos, bacharel em Ciências Biológicas e pós-graduanda em Gestão e Licenciamento Ambiental, atua há mais de 16 anos como analista ambiental, com ênfase em Limnologia. Possui atuação em consultorias, órgãos ambientais e docência, com foco em monitoramento, licenciamento e gestão de projetos ambientais. Gerente financeira e de pessoas da Flumen Consultoria.

	**Sandra FRANCISCHETTI** Bióloga (UFJF) com mais de 25 anos de experiência. É Mestre em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre (UFMG) e especialista em Restauração Ecológica e Licenciamento Ambiental (MBA/UFSCar 2025). Atua em estudos de ecossistemas aquáticos continentais voltados ao licenciamento ambiental de hidrelétricas, mineração e infraestrutura; é membro do Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Pará-MG.
	**Sônia BAUMGRATZ** Geógrafa (Bacharel-Licenciada) pelo Instituto de Geociências da UFMG; mapeamento geomorfológico (bolsista do DAAD) pelo Geographisches Institut da Univesidade Heidelberg (RFA); pesquisadora, por 11 anos, da Fundação Cetec (Sup. Recursos Minerais) de MG; curso sobre controle de erosão/assoreamento no IRTCES da RPChina (1988), e, desde 1989, Diretora Técnica da Ecodinâmica, com vasta atuação em trabalhos técnicos e científicos e em gestão integrada de empreendimentos setor elétrico, minerário entre outras esferas de produção.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

SENSIBILIZAÇÃO DE COMUNIDADES RIBEIRINHAS PARA A CONSERVAÇÃO DA FAUNA AMAZÔNICA

Andria PIMENTEL
Engenheira Ambiental – Universidade do Estado do Pará

Nubia AFRA
Administradora - Associação Internacional de Educação Continuada-AIEC

Bruno BAHIANA
Engenheiro Agrícola e Ambiental - Universidade Federal Fluminense

Paulo OLIVEIRA
Licenciatura em Ciências Biológicas - Universidade Federal do Pará

RESUMO

No âmbito do Programa de Educação Ambiental (PEA) da Usina Hidrelétrica (UHE) Belo Monte, foram estabelecidas ações de sensibilização comunitária baseadas em processos socioeducativos voltados ao desenvolvimento sustentável. A utilização de caricaturas de animais como ferramenta para a educação ambiental é uma estratégia eficiente, pois são instrumentos valiosos para a aproximação da população humana com o ambiente natural. O objetivo deste trabalho foi sensibilizar e engajar a população ribeirinha da Volta Grande do Xingu (Pará) na conservação da fauna amazônica, utilizando um conjunto de espécies de quelônios, aves, peixes, mamíferos terrestres e aquáticos. As metodologias não-formais incluíram cineclube, palestras, exposições, oficinas e distribuição de materiais educativos. Ao longo de quatro anos (2021–2025), realizaram-se 60 ações, alcançando 1.103 interações em 17 comunidades e um Sistema de Transposição de Embarcações. Os participantes passaram a atuar espontaneamente como multiplicadores ambientais em suas localidades. O engajamento sustentado indica um processo promissor de sensibilização ambiental, reforçando a importância da continuidade dessas iniciativas para a conservação da fauna na região.

ABSTRACT

Within the scope of the Environmental Education Program (PEA) of the Belo Monte Hydroelectric Power Plant (UHE), community awareness actions were established based on socio-educational processes focused on sustainable development. The use of animal caricatures as a tool for environmental education is an efficient strategy, as

they are valuable instruments for bringing the human population closer to the natural environment. The objective of this work was to sensitize and engage the riverside population of the Volta Grande do Xingu (Pará) in the conservation of Amazonian fauna, using a set of species of turtles, birds, fish, terrestrial and aquatic mammals. Non-formal methodologies included film screenings, lectures, exhibitions, workshops, and distribution of educational materials. Over four years (2021–2025), 60 actions were carried out, reaching 1,103 interactions in 17 communities and a Vessel Transposition System. Participants spontaneously began to act as environmental multipliers in their localities. Sustained engagement indicates a promising process of environmental awareness, reinforcing the importance of continuing these initiatives for the conservation of wildlife in the region.

1. INTRODUÇÃO

O rio Xingu nasce no estado do Mato Grosso, na região do Parque Indígena do Xingu, a partir da confluência de outros rios. Possui suas margens habitadas por diversos povos, sobretudo indígenas e ribeirinhos [1], onde o termo Ribeirinho refere-se a um modo de vida muito peculiar a um espaço físico bem característico da Região Amazônica, qual seja, o rio e seu entorno [2].

Na contemporaneidade têm-se situações muito específicas em que a sociedade se debruça diante da necessidade de repensar a relação com determinadas espécies que se encontram em risco de extinção. A amazônica abriga espécies que se enquadram nessa necessidade e por isso vários programas de conservação e educação ambiental foram ganhando espaço nas comunidades urbanas e rurais [3].

No âmbito do Programa de Educação Ambiental (PEA) da Usina Hidrelétrica Belo Monte - (item 7.3 do Projeto Básico Ambiental) foram estabelecidas ações que visam a sensibilização da comunidade para os temas de Educação Ambiental, promovendo ações junto a públicos diferenciados – crianças, jovens, adultos e idosos – em formação não formal por meio de processos socioeducativos com foco no desenvolvimento sustentável.

Envolver as pessoas em ações concretas é uma tarefa complexa, e nenhuma ferramenta isolada consegue levar o público da apatia ao engajamento. Por isso, o desenvolvimento de uma variedade de ferramentas para incentivar ou inspirar ações favoráveis à conservação é um campo ativo de pesquisa [4].

Nesse sentido, a utilização de figuras de animais faunístico e quelônios como ferramenta para a educação ambiental é uma estratégia eficiente, pois são instrumentos valiosos para a aproximação da população humana com o ambiente natural [5].

1.1 Objetivo

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo relatar os resultados das ações de sensibilização da população ribeirinha da Volta Grande do Xingu que se apoiaram no uso de espécies da fauna local como ferramenta pedagógica para a conservação, destacando o papel da educação ambiental como instrumento de transformação social e fortalecimento da participação comunitária.

2. METODOLOGIA

As estratégias de sensibilização apoiaram-se em metodologias não-formais variadas e adaptadas à realidade logística ribeirinha, incluindo: (1) cineclube, com exibição de vídeos educativos via computador; (2) distribuição de material socioeducativo de sensibilização, como bonés, camisetas, adesivos, bolsas e chaveiros estampados com ilustrações vetorizadas das espécies listadas, acompanhadas de frases curtas de incentivo à conservação; (3) exposições, montadas com pôsteres em formato A1, contendo fotografias, mapas de distribuição e informações biológicas das espécies, para visualização coletiva durante as ações; (4) oficinas participativas, no qual o público receberam camisetas e panos de prato previamente vetorizados com contornos dos animais listados, além de tintas para tecido e pincéis, podendo personalizar os itens por meio de pintura manual e, posteriormente, utilizá-los em seus

lares; e, (5) palestras, conduzidas em formato expositivo, com suporte de banners impressos ou apresentações em slides digitais.

As ações tiveram como eixo central um conjunto de espécies da fauna local, escolhidas por sua relevância ecológica e seu valor simbólico para as comunidades ribeirinhas. Entre os quelônios, foram trabalhadas a tartaruga-da-amazônia (*Podocnemis expansa*), o tracajá (*Podocnemis unifilis*), o pitiú (*Podocnemis sextuberculata*), o jabuti-piranga (*Chelonoidis carbonaria*) e o jabuti-tinga (*Chelonoidis denticulata*). As aves incluíram a garça-moura (*Ardea cocoi*), a biguatinga (*Anhinga anhinga*), o cardeal-da-amazônia (*Paroaria gularis*) e a cigana (*Opisthocomus hoazin*). Os mamíferos terrestres foram representados pela cutia-vermelha (*Dasyprocta leporina*), paca (*Cuniculus paca*), gambá-de-orelha-branca (*Didelphis albiventris*), guariba-de-mãos-ruivas (*Alouatta belzebul*) e anta-brasileira (*Tapirus terrestris*). Para os mamíferos aquáticos, utilizaram-se o boto-cor-de-rosa (*Inia geoffrensis*), a ariranha (*Pteronura brasiliensis*), a lontra (*Lontra longicaudis*) e o peixe-boi-da-amazônia (*Trichechus inunguis*). Entre os peixes, destacaram-se o cascudo-zebra (*Hypancistrus zebra*) e o zebra-marrom (*Hypancistrus yudja*).

O registro das ações ocorreu por meio de listas de presença preenchidas no local, coletando-se nome, local de moradia e informações de contato dos participantes. Em atividades de maior dinamismo, como as exposições, empregaram-se listas de contagem de público – planilhas quadriculadas numeradas de 01 a 100, nas quais se marcava um número a cada nova interação realizada. De forma complementar, a equipe realizou registros fotográficos por meio de aparelho celular, utilizando aplicativo configurado para marcar automaticamente data e posição geográfica em cada imagem. Todos os dados coletados encontram-se armazenados na base de dados do Programa de Educação Ambiental da UHE Belo Monte.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As atividades tiveram início em dezembro de 2021 e, até dezembro de 2025, somaram 60 ações e 1.103 interações, distribuídas por 17 comunidades ribeirinhas e pelo Sistema de Transposição de Embarcações (STP) da UHE Belo Monte. As comunidades atendidas integram a área de abrangência do Programa de Educação Ambiental e reúnem um público formado majoritariamente por pescadores e ribeirinhos, espalhados em um raio de aproximadamente 100 km. O acesso a esses locais dependeu de rotas estratégicas e do uso combinado de caminhonetes e embarcações, o que se mostrou decisivo para o êxito da mobilização.

As Figuras a seguir registram as atividades executadas:



Figura 01: Cineclube – Conservação e Preservação de Habitats - Assurini



Figura 02: Distribuição de Material de Sensibilização - Campanha não Atropelamento de Animais por Embarcações - Sistema de Transposição de Embarcações da UHE Belo Monte



Figura 03: Distribuição de Material de Sensibilização - Proteção de mamíferos e quelônios -Travessão Caracol e Travessão Pirarara



Figura 04: Exposição - Ictiofauna - Vila da Ressaca



Figura 05: Oficina – Pintura em camisetas e panos de prato – Travessão Rio das Pedras



Figura 06: Exposição – Fauna – Ilha da Fazenda

As ações foram planejadas para alcançar diferentes faixas etárias: crianças, jovens, adultos e idosos, de modo a democratizar o conhecimento e valorizar tanto o saber técnico quanto o empírico. Durante as atividades, os educadores inseriram, na linguagem técnica, informações sobre o comportamento e a ecologia das espécies monitoradas pelos projetos da usina. Em contrapartida, os ribeirinhos trouxeram nomes populares, observações sobre o movimento das embarcações, disputas pelo pescado e mudanças percebidas na paisagem ao longo dos anos. Essa troca conferiu às ações um caráter contextualizado.

Entre o público escolar, notou-se um interesse crescente em entender o papel dos programas de monitoramento na região. A inclusão de datas como a Semana da Fauna no calendário escolar foi sugerida espontaneamente pelos próprios professores, indicando que a escola pode atuar como ponto de ancoragem para a continuidade das discussões ambientais.

A diversidade de metodologias não-formais mostrou-se um acerto. Oficinas de pintura de camisetas e panos de prato, por exemplo, proporcionaram uma experiência sensorial: tocar o tecido, escolher as cores, preencher os contornos dos animais, que parece ter favorecido a fixação da mensagem. Os objetos personalizados (pano de prato) entraram no cotidiano dos participantes e continuaram gerando conversas sobre a fauna muito além do momento da ação. A repetição do conteúdo em diferentes linguagens (vídeos, pôsteres, objetos, palestras) ampliou as chances de a mensagem ser assimilada e multiplicada.

Manter o engajamento ao longo de quatro anos e observar os moradores atuando espontaneamente como multiplicadores, algo que se reflete na procura constante pelas atividades, são sinais promissores de que o processo de sensibilização está, de fato, em curso.

4. CONCLUSÕES

As metodologias não-formais, sobretudo as oficinas participativas e a distribuição de materiais personalizados, mostraram-se eficazes para engajar as comunidades ribeirinhas e fazer a mensagem conservacionista circular para além dos momentos

formais de ação. A resposta positiva dos moradores e a procura recorrente pelas atividades indicam que iniciativas desse tipo precisam ser contínuas: é a presença regular que solidifica vínculos de confiança e mantém abertas as oportunidades de diálogo sobre a fauna.

Nesse percurso, as ações vêm difundindo orientações práticas de respeito aos animais: como manter distância ao avistar uma lontra, desligar o motor diante de quelônios, não oferecer alimento, soltar com cuidado os indivíduos capturados acidentalmente e acionar os órgãos ambientais competentes, além de alertar sobre os riscos do consumo de carne de caça para a saúde humana. Espera-se que a circulação continuada dessas informações, ancorada nos vínculos construídos com as comunidades, favoreça a incorporação gradual de condutas compatíveis com a conservação da fauna e com a legislação ambiental.

5. PALAVRAS-CHAVE

Educação ambiental, rio Xingu, biodiversidade, metodologias não-formais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FERREIRA, D. C. (2019) – “Caminhos do Rio Xingu: povos, paisagens e belezas naturais no Médio Xingu”, Amazônica - Revista de Antropologia, v. 11, Belém, Brasil.

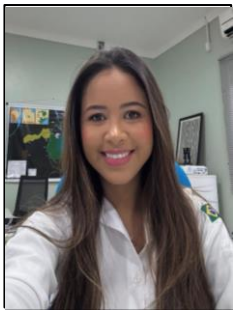
[2] NETO, F. R.; FURTADO, L. G. (2015) – “A ribeirinidade amazônica: algumas

reflexões”, Cadernos de campo, n. 24, São Paulo, Brasil.

[3] MATEUS, W. D.; HIGUCHI, M. I. G. (2020) – “Percepções na Conservação da Fauna Silvestre Amazônica em Risco de Extinção”, Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science, v.9, n.1, Anápolis, Brasil.

[4] ROOT-BERNSTEIN, M.; ARMESTO, J. (2013) – “Selection and Implementation of a Flagship Fleet in a Locally Undervalued Region of High Endemicity”, Ambio, v. 42, Sweden.

[5] Oliveira, F. A.; RÉGIS, M. M.; FRANCOS, M. S. (2020) – “O uso de animais como ferramenta para educação ambiental: uma revisão sistemática”, Revista Científica ANAP Brasil, v. 13, São Paulo, Brasil.



Andria PIMENTEL

Brasileira, residente em Altamira, PA. Bacharel em Engenheira Ambiental pela Universidade do Estado do Pará (UEPA), especialista em Gestão de Programas Sociais pela Universidade Estácio de Sá, Mestre em Biodiversidade e Conversação pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Atua como Analista Socioambiental na Norte Energia S.A e acompanha os Programas

	e Projetos no âmbito do licenciamento ambiental da Usina Hidrelétrica Belo Monte.
	**Nubia AFRA** Brasileira, residente em Altamira, PA. Bacharel em Administração. Pós-graduada em Direito Ambiental pela Faculdade de Rondônia (FARO) e MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas. Atua como Gerente de Projetos Socioambientais na Norte Energia S.A.
	**Bruno BAHIANA** Brasileiro, residente em Altamira, PA. Bacharel em Engenheira Ambiental pela Universidade Federal Fluminense, Mestre em Biodiversidade e Conversação pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Atua como Superintendente Socioambiental na Norte Energia S.A.
	**Paulo OLIVEIRA** Brasileiro, residente em Altamira, PA. Graduado em Licenciatura plena em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Atua como Analista Socioambiental no Centro Regional de Educação Ambiental do Xingu (CREAX) e acompanha os Programas de Educação Ambiental da Usina Hidrelétrica de Belo Monte.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

SUPRESSÃO DE VEGETAÇÃO NA ÁREA DE INFLUÊNCIA PÉ DA BARRAGEM DA UHE CAMARGOS

Márcio Pereira WERNECK
Técnico Segurança de Barragens - Cemig Geração e Transmissão S.A.

Thiago Vinícius de OLIVEIRA
Supervisor Técnico Ativos de Geração – Cemig Geração e Transmissão S.A.

RESUMO

O projeto foi desenvolvido na Usina de Camargos, município de Itutinga-MG, com início dos estudos preliminares em agosto de 2013. Foram realizadas visitas técnicas, análise de documentos, levantamentos topográficos e inspeções de campo para avaliação atualizada das áreas de influência da barragem.

O estudo identificou vegetação de mata ciliar crescendo na área de influência de segurança, especificamente na ombreira direita da barragem de terra, comprometendo as inspeções visuais e o monitoramento adequado desta região. A área afetada totalizava 5.000 m² com necessidade de intervenção imediata.

Após realização de inventário florestal, georreferenciamento e elaboração de projeto técnico, a área de meio ambiente da CEMIG obteve autorização para Exploração Florestal. Foi conduzido processo licitatório para contratação da supressão e relocação de 250 metros lineares de cerca.

A supressão da vegetação possibilitou, também, a manutenção preventiva dos medidores de vazão instalados nas saídas dos sistemas de drenagem interna do maciço e suas canaletas, permitindo melhorias no registro sistemático das vazões e identificação de tendências de percolação, importante indicador de segurança estrutural da barragem.

A área desobstruída oferece, agora, maior visibilidade para detecção precoce de anomalias, ampliando a confiabilidade do monitoramento.

Por fim, a supressão controlada da vegetação contribui para o atendimento às boas práticas de engenharia e às exigências dos planos de segurança de barragens, reforçando a gestão de riscos e a confiabilidade da estrutura ao longo de sua vida útil.

Classificação: Direcionado

ABSTRACT

The project was developed at the Camargos Power Plant, in the municipality of Itutinga-MG, with preliminary studies beginning in August 2013. Technical visits, document analysis, topographic surveys, and field inspections were conducted for an updated assessment of the dam's areas of influence.

The study identified riparian vegetation growing in the safety influence area, specifically on the right abutment of the earth dam, compromising visual inspections and proper monitoring of this region. The affected area totaled 5,000 m² requiring immediate intervention.

After conducting a forest inventory, georeferencing, and preparing a technical project, CEMIG's environmental department obtained authorization for Forest Exploitation. A bidding process was conducted for contracting the suppression and relocation of 250 linear meters of fence.

The vegetation suppression also enabled preventive maintenance of flow meters installed at the outlets of the internal drainage systems of the massif and its channels, allowing improvements in the systematic recording of flows and identification of seepage trends, an important indicator of the dam's structural safety.

The cleared area now provides greater visibility for early detection of anomalies, enhancing monitoring reliability.

Finally, the controlled vegetation suppression contributes to compliance with engineering best practices and dam safety plan requirements, reinforcing risk management and the structure's reliability throughout its service life.

Classificação: Direcionado

1. INTRODUÇÃO

As questões das barragens são importantes para o país porque está relacionada com o seu desenvolvimento econômico. Porém é pertinente avaliar os custos e benefícios considerando-se os impactos ambientais causados pelas construções.

As barragens de uso múltiplo criam benefícios como o abastecimento de água, geração de energia e irrigações em geral para a agricultura.

O lago ou reservatório inunda grandes áreas que podem ser utilizadas para outras atividades, como agricultura, pecuária, lazer, patrimônio histórico e cultural e reservas ambientais.

O principal problema que técnicos e especialistas de diversos países tentam solucionar, refere-se à redução dos impactos negativos das barragens e que devem ser amenizados otimizando os custos, os benefícios na área social e nos meios bióticos e físicos.

A área de influência de uma barragem de terra compreende toda a região geográfica que sofre impactos, sejam eles positivos ou negativos, decorrentes da construção e operação desse tipo de empreendimento. Esse conceito é fundamental para o planejamento, licenciamento ambiental e gestão de riscos associados às barragens, especialmente considerando que as estruturas de terra apresentam vulnerabilidades específicas que demandam atenção especial.

As áreas de influência, imediatamente a montante e a jusante de barragens, são consideradas como parte integrante destas estruturas, e estabelecem as condições requeridas para estas áreas, de forma a garantir a segurança das barragens.

O estudo das partes que compõem o diagnóstico do problema, ou seja, as áreas de influências e suas distâncias de segurança, quando não atendidas, não possibilita a detecção de anomalias que possam colocar em risco a estabilidade da barragem, tais como fissuras, escorregamentos e percolações.

Foi evidenciado na Usina de Camargos, em 2013, que as áreas de influência da barragem desta Usina estavam com as distâncias relacionadas em projeto diferente das relacionadas no local e ficando as inspeções nestas áreas prejudicadas.

A segurança de barragens no setor elétrico sempre foi tratada como prioridade fundamental, sendo conduzida com elevado rigor técnico pelo sistema elétrico brasileiro desde as fases iniciais de projeto, durante todo o processo de construção e ao longo de toda a vida útil das estruturas por meio de programas consistentes de manutenção e monitoramento.

A responsabilidade pela segurança de uma barragem não termina com sua construção, estende-se por toda a vida útil da estrutura.

Este artigo relata o conhecimento e identificação de forma adequada da área de influência da barragem de UHE Camargos com a finalidade de executar com qualidade técnica o monitoramento da segurança da barragem e contribuir para o aperfeiçoamento da gestão das áreas de influência.

Classificação: Direcionado

2. HISTÓRICO

2.1 Complexo de Usinas Itutinga e Camargos

2.1.1 UHE Itutinga

CEMIG (1986) relata que a “primitiva ideia” do aproveitamento hidrelétrico de Itutinga nasceu no ano de 1921, quando foi levantado o problema de eletrificação na antiga estrada de ferro Oeste de Minas. Entretanto, somente em 08/02/1952, com a criação da CEMIG, foi iniciada a sua construção, sendo o primeiro aproveitamento na bacia do rio grande.

Segundo CEMIG (1986) a barragem foi construída ao lado da antiga ponte da estrada de ligação das cidades de São João Del Rei e Lavras. A usina e seu reservatório encontram-se na confluência dos municípios de Itutinga e Nazareno.

Como a usina de Camargos, a usina de Itutinga também está localizada na vertente ocidental da serra da Mantiqueira.

Nesta região ocorrem rochas do grupo São João Del Rei e associação de granito gnaisses. As rochas desta região são basicamente xistos, quartzitos, granitos e pegmatito. Nota-se grande variação na litologia local, entretanto a barragem está situada em um tipo litológico bem definido.

A barragem de Itutinga está assentada sobre extenso afloramento de granito de cor clara com predomínio de quartzo, feldspato e pouca biotita. Este maciço é cortado por veios e bolsões de pegmatito, que formam regiões de aspecto mais homogêneo, de cor mais clara.

O arranjo geral do aproveitamento hidrelétrico de Itutinga, apresentado na Figura 1, consiste no aproveitamento de um desnível formado por duas cachoeiras que se sucedem em uma curva do rio de raio aproximado de 200 metros.

A barragem é mista, situada no local mais estreito do rio. A barragem de terra da ombreira esquerda, com a crista na elevação 890,00 metros (em relação ao nível do mar), faz a ligação com a margem direita através de uma barragem de concreto gravidade, assentada em rocha maciça, perfazendo um comprimento total de 550,50 metros na crista.

O fluxo do rio é desviado para a margem esquerda, através de um canal, que vai até a câmara de carga. Desta saem quatro condutos forçados, de 4,20 metros de diâmetro, os quais alimentam as turbinas da casa de força. Esta é do tipo semi-abrigada, constituída de uma estrutura de concreto, localizada junto à margem esquerda do rio.

A barragem de terra tem 253 metros de comprimento por 5m de largura na crista elevação 832,00 metros.

Seu maciço é formado por núcleo impermeável de argila, assentado em uma trincheira aberta em terreno natural. As faces de montante e jusante são revestidas de materiais

Classificação: Direcionado

permeáveis com os taludes respectivamente inclinados de 1:3,5 e 1:3. O talude montante é revestido por uma camada de enrocamento e o de jusante por grama.

O filtro de fundação é formado por um tapete de pedras graduadas, a jusante do núcleo, até o pé do talude.

A barragem de concreto é do tipo gravidade, com fundação sobre rocha maciça, provida de tomada d'água e vertedouros, perfazendo um comprimento total de 297,50 metros. A tomada d'água para o canal de adução tem 51 metros de largura, dividida em dez vãos livres de 4,2 metros, providos de grades de proteção e guias de stop-logs. Possui também três vertedouros, estando o primeiro do lado direito da tomada d'água, com a finalidade de escoar o lixo carregado pelo rio. O segundo é o vertedouro principal, com a finalidade de elevar em 6m a lâmina d'água do reservatório acima da soleira e dar vazão às enchentes excepcionais. É provido de cinco comportas de setor. Finalmente, o terceiro é um vertedouro auxiliar que se encontra à direita do vertedouro principal, também para descarga de lixo e manter o reservatório no nível normal de operação durante as grandes cheias.

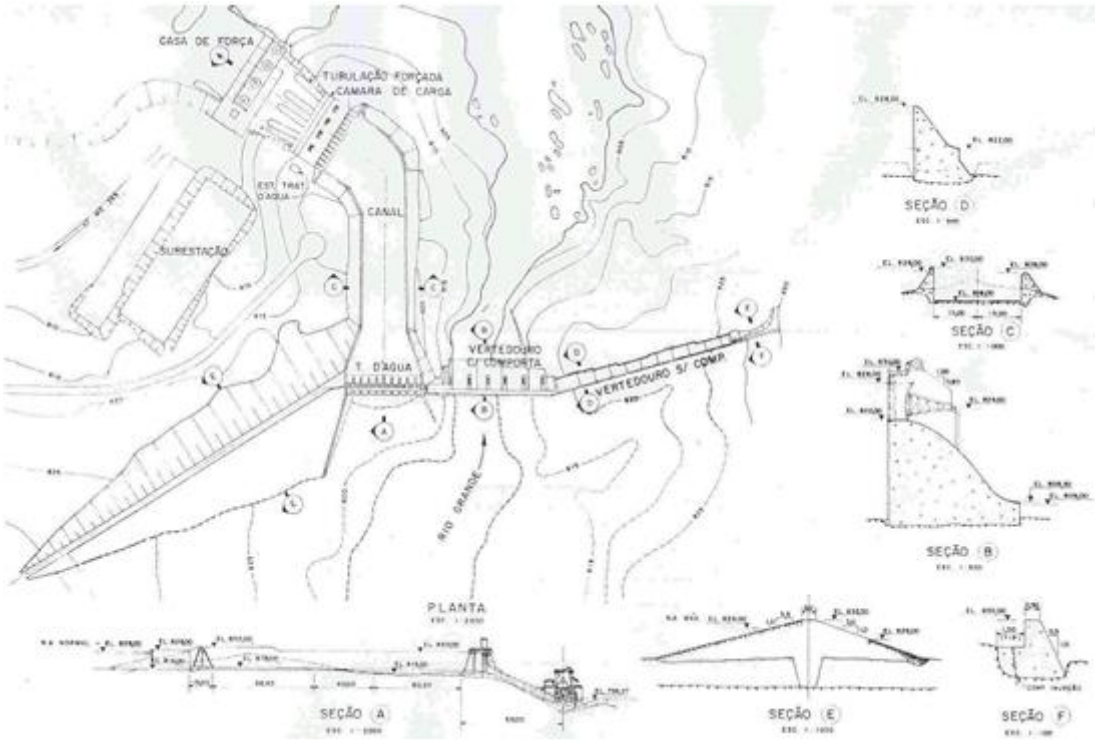


Figura 1 – Arranjo geral e seção da barragem de Itutinga.

Fonte: Ferreira. (2007, p.14).

2.1.2 UHE Camargos

CEMIG (1986) relata que a usina de Camargos fez parte do plano diretor de obras que o Estado vinha executando desde 1951, na bacia do alto rio Grande. Faziam parte deste plano os seguintes aproveitamentos: Itutinga, São Miguel, Funil, Inferno e Aiuruoca. No curso do rio Grande, cerca de 5km a montante da usina de Itutinga, a

Classificação: Direcionado

usina de Camargos é o aproveitamento mais a montante, permitindo a acumulação de grande volume de água e a regularização plurianual do alto rio Grande, com consequente benefícios para as usinas de jusante.

A usina está localizada na vertente ocidental da serra da Mantiqueira. Nesta região ocorrem rochas do grupo São João Del Rei e associação de granito-gnaisses. As rochas desta região são basicamente xistos, quartzitos, granitos e pegmatito. Nota-se grande variação na litologia local, entretanto a barragem está situada em um tipo litológico bem definido.

Segundo CEMIG (1986) a barragem de Camargos está assentada sobre micaxisto do grupo São João Del Rei, com xistosidade crenulada e nódulos de quartzo. Ocorre rocha sã apenas no corte junto à subestação, sendo as demais áreas cobertas com solo ou rocha decomposta.

Quanto ao arranjo geral (Figura 2), o aproveitamento hidrelétrico de Camargos consiste em uma barragem mista de aterro compactado e blocos de concreto gravidade, perfazendo um comprimento total de 598 metros, cuja crista está na elevação 915,00 metros.

A ala direita (Figura 3) corresponde à barragem de terra, com 220 metros na crista e ala esquerda corresponde à barragem de concreto, provida de vertedouro e tomada d'água. O vertedouro é provido de seis comportas e duas válvulas de descarga de fundo. A tomada d'água para as unidades geradoras é provida de três comportas por unidade e os condutos são de baixa pressão, moldados em concreto. Ao longo do maciço da barragem de concreto encontra-se a galeria de drenagem e injeção.

Na parte posterior da seção da tomada d'água fica localizada a casa de força, que faz parte integrante do corpo da barragem. A casa de força é do tipo abrigado convencional, onde estão duas unidades geradoras, com turbinas "Kaplan" de 30.000 hp e caixa espiral moldada em concreto.

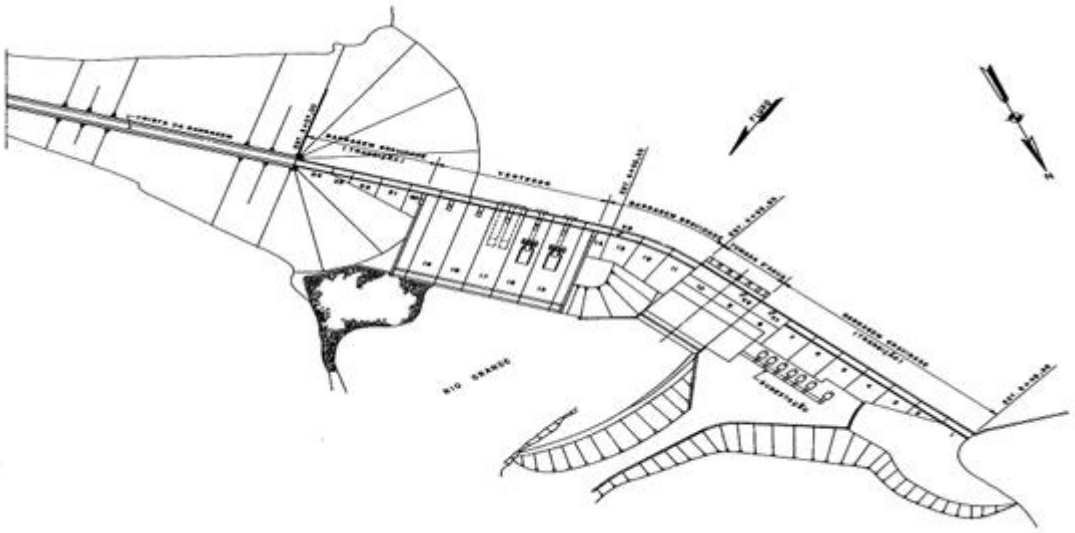


Figura 2 – Arranjo geral da barragem de Camargos.

Fonte: Ferreira. (2007, p.18).

Classificação: Direcionado

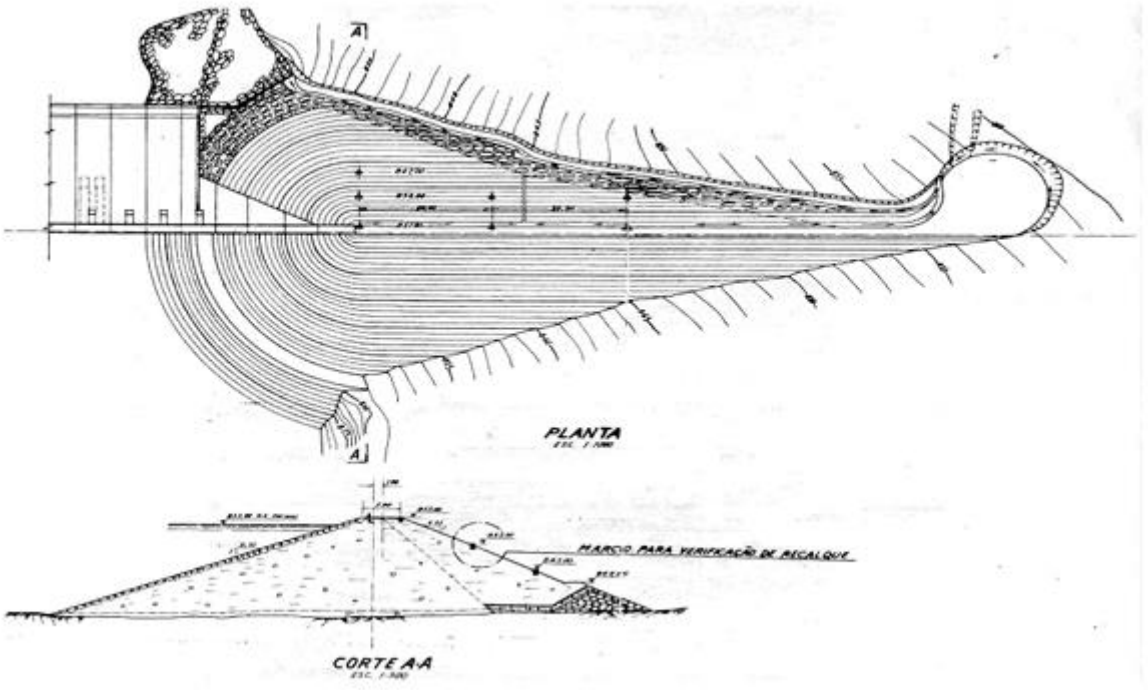


Figura 3 – Seção da barragem de Camargos.

Fonte: Ferreira. (2007, p.18).

2.2 Estudos preliminares

O projeto foi realizado na Usina de Camargos, no município de Itutinga - Minas Gerais.

Como etapa preliminar dos estudos, procedeu-se a uma pesquisa com início em 12/08/2013 sobre a Usina de Camargos e suas áreas de influência da barragem. Foi também feito um estudo geral dos documentos técnicos existentes na CEMIG, necessários à compreensão do projeto e construção da barragem de Camargos, e inspeções de campo para a avaliação atualizada das áreas de influência.

Foram realizadas um total de 10(dez) visitas, no prazo total de estudo de 1(um) ano, as visitas foram iniciadas em 15/5/2014 e finalizadas em 15/05/2015. O levantamento topográfico e medições foram realizados entre os dias 10 de outubro de 2014 a 15 de abril de 2015. O objetivo foi fazer medições e levantamentos das áreas consideradas de influência.

O objeto de estudo onde foi levantado o problema referente à área de influência localiza-se na jusante da barragem de terra coberta de vegetação. O controle adequado da vegetação nesta zona é um requisito técnico essencial para a gestão da segurança da barragem.

Desta forma, foi feito uma medição para quantificar o tamanho da área atingida pela vegetação e que está dentro da área considerada de influência de segurança.

A medição foi feita através do uso de trenas e GPS (Sistema de Posicionamento Global). Estes dados foram usados para quantificar o tamanho das áreas.

Classificação: Direcionado

Segue abaixo as fotos (Figuras 4 e 5) do local onde a vegetação se encontra na área de influência.



Figura 4 – Local da vegetação na barragem da UHE Camargos.



Figura 5 – Local da vegetação na barragem da UHE Camargos.

Classificação: Direcionado

3. EXECUÇÃO DA SUPRESSÃO

Foram feitas as medições das áreas e obtidos os seguintes resultados:

- Largura aproximada da faixa de vegetação: 20 metros;
- Comprimento aproximado da faixa de vegetação: 250 metros;
- Área total usada para contratação do serviço de supressão: 5000 m².

Com a área calculada, inventário florestal realizado (levantamento das espécies), georreferenciamento da área, projeto técnico e justificativa técnica da supressão a área de meio ambiente da Cemig fez a solicitação de autorização junto ao órgão ambiental.

Após receber a autorização, foi realizada uma licitação para fazer a supressão da vegetação de mata ciliar na ombreira direita da barragem e a relocação de 250 metros lineares de cerca (mourão de concreto e fios de arame farpado).

Para a supressão da vegetação foi necessária a autorização para Exploração Florestal concedida pelo Instituto Estadual de Florestas. A empresa vencedora da licitação iniciou os trabalhos conforme abaixo (Figura 6).



Figura 6 – Supressão da vegetação de mata ciliar na barragem da UHE Camargos.

Classificação: Direcionado



Figura 7 – Supressão da vegetação de mata ciliar na barragem da UHE Camargos.

A imagem acima (Figura 7) registra a etapa de desmobilização e limpeza final, compreendendo a remoção de equipamentos, organização dos resíduos vegetais e restauração das condições adequadas da área.

Após a supressão da vegetação foi realizada a manutenção dos medidores de vazão instalados nas saídas dos sistemas de drenagem interna do maciço e suas canaletas (Figuras 8 e 9). As atividades incluíram a remoção de sedimentos, vegetação e detritos que obstruíam as canaletas e poderiam alterar as condições de escoamento, além da adequada calibração deles permitindo um registro sistemático das vazões medidas permitindo identificar tendências de percolação através do maciço ou fundação, consistindo em importante indicador de segurança.

Classificação: Direcionado



Figura 8 – Manutenção da canaleta e do medidor de vazão.



Figura 9 – Retorno da operação do medidor de vazão.

Após o término de todos dos trabalhos e todos executados satisfatoriamente, a supressão da vegetação retornou com a área de influência de segurança da barragem de Camargos, trazendo de volta a possibilidade de inspeções nesta área (Figuras 10 e 11).

Classificação: Direcionado



Figura 10 – Vista geral da ombreira direita da UHE Camargos.



Figura 11 – Trabalhos executados, cerca de arame relocada e resultado final.

A situação encontrada que revelou o objetivo deste projeto encontrou evidências já discutidas pelo Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (1983), que a inexistência de uma legislação no passado não apresentava exigências detalhadas, no que diz respeito à segurança de barragens.

Desta forma, com a criação das Diretrizes para a Inspeção e Avaliação de Segurança de Barragens em Operação, em 1983, as empresas geradoras de energia passaram a contar com informações estruturadas, o que as levou à adoção de métodos e programas de inspeções.

Classificação: Direcionado

Na Cemig, após a adoção destas diretrizes, foi criada uma gerência em 1996 para trabalhar com Segurança de Barragens, com o intuito de atender a esta demanda e garantir o bom funcionamento das usinas e dos reservatórios.

4. CONCLUSÕES

Diante da importância estratégica da segurança de barragens de usinas hidrelétricas para o país, tornam-se imprescindíveis inspeções periódicas, monitoramento contínuo e leitura sistemática de instrumentos. Essas ações permitem coletar dados consistentes para avaliar as condições estruturais da barragem e garantir sua operação segura.

Os estudos realizados identificaram áreas de influência críticas para a barragem da Usina de Camargos, permitindo propor ações corretivas para restabelecer os parâmetros de segurança.

A supressão da vegetação possibilitou, adicionalmente, a manutenção preventiva dos medidores de vazão e a limpeza das canaletas de drenagem existente, ampliando a confiabilidade do monitoramento. A área desobstruída oferece agora maior visibilidade para detecção precoce de anomalias anteriormente encobertas pela vegetação.

Os resultados demonstram que a barragem da Usina de Camargos apresenta condições adequadas de segurança, com capacidade de manutenção e aprimoramento contínuo.

5. PALAVRAS-CHAVE

Supressão, Vegetação, Manutenção, Segurança, Barragem, Inspeções.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA, REABILITAÇÃO E ALTEAMENTO DE BARRAGENS DE TERRA. Disponível em: http://www.maxwell.vrac.puc rio.br/3969/3969_3.PDF. Acesso em 02 de fevereiro de 2015.

CACHAPUS, P.B.B. (2006). Usinas da Cemig 1952-2005, Rio de Janeiro.

CELERI, A. Monitoring instrumentation and safety dams. River and Dam Engeneering, 2, 1995, Brazil.

CEMIG (1986). Relatório Final. UHE Camargos – Inventário Civil.

CEMIG (1986). Relatório Final. UHE Itutinga – Inventário Civil.

COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. Diretrizes para a Inspeção e Avaliação de Segurança de Barragens em Operação, Rio de Janeiro, 1983, 26 p.

Classificação: Direcionado

COMISSÃO REGIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS, NÚCLEO REGIONAL DE SÃO PAULO. Guia básico de segurança de barragens (1999). Trabalho apresentado no XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, acontecido em Belo Horizonte – MG, em março de 1999.

COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. Comissão Regional de Segurança de Barragens Núcleo Regional de São Paulo, Guia Básico de Segurança de Barragens, São Paulo, 1999.

CRUZ, J. F.; Reavaliação da segurança da barragem de terra da Usina Hidrelétrica do Piau//.-2007.Disponível Acesso em 02 de fevereiro de 2015. em:

CRUZ, P.T 100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto. Oficina de Textos, São Paulo, 1996. 36

KUPERMAN, S.C.; MORETTI, M.R.; RE, G.; PEREIRA, P. N.; SANTOS, R.P. E FERREIRA, W.V.F. Reavaliação da Instrumentação de Auscultação Instalada em Barragens da CESP. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens, p. 116-134, Salvador, BA, 2005.

MATOS, S. F. Validação de instrumentos para auscultação de barragem de concreto. Estudo de caso: deformímetros e tensômetros para concreto na barragem de itaipu (2002)

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL – Brasília. Manual de Segurança e Inspeção de Barragens; 2002. 148p.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Diretrizes ambientais para projeto e construção de barragens e operação de reservatórios. / Ministério da Integração Nacional, Secretaria de Infraestrutura Hídrica, Unidade de Gerenciamento do Proágua/Semiárido. – Brasília: Bárbara Bela Editora Gráfica e Papelaria Ltda., 2005.

PIMENTEL, V. C. R. Alternativas de Soluções para os Impactos Físicos de Barragens, 2004.

PRESIDÊNCIA DA REPUBLICA. CASA CIVIL. Lei Nº 12.334, DE 20 DE SETEMBRO DE 2010. Política Nacional de segurança de barragens.

Classificação: Direcionado



Márcio Pereira WERNECK

Eng. Civil especialista em Formas Alternativas de Energia e Inovações Tecnológicas pela UFLA.
Na Cemig desde 1990 como Técnico em Segurança de Barragens; experiência em administrar grande volume de tarefas, definindo prioridades com foco na visão estratégica e nos resultados esperados. Domínio em orçamentação, especificações técnicas, acompanhamento e medição de obras e experiência em trabalho de campo.



Thiago Vinícius de OLIVEIRA

Engenheiro Civil e Técnico em Eletroeletrônica, com atuação na CEMIG desde 2002 no setor de energia. Possui sólida experiência em operação, manutenção, planejamento e gestão de ativos de geração. Atua na liderança de equipes e supervisão de ativos de grandes usinas.

Classificação: Direcionado

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.3
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

USO FUTURO COMO VARIÁVEL ESTRATÉGICA NO CICLO DE VIDA DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS: DIRETRIZES GERAIS PARA PROJETO, OPERAÇÃO, FECHAMENTO E PÓS-FECHAMENTO

Carine LIMA
Engenheira Ambiental - Pimenta de Ávila Consultoria

Giani ARAGÃO
Engenheira Ambiental/Geotécnica - Pimenta de Ávila Consultoria

Maíra REIS
Engenheira Ambiental/Geotécnica - Pimenta de Ávila Consultoria

RESUMO

O aumento das exigências regulatórias, bem como a evolução das práticas de descaracterização e reabilitação de barragens têm evidenciado a necessidade de incorporar, desde a concepção, a análise estruturada do uso futuro das áreas após a operação. Contudo, essa discussão ainda é conduzida, em muitos casos, de forma isolada ou tardia, com limitada integração às decisões de engenharia e ao planejamento operacional, econômico e territorial. Como consequência, podem ser adotadas soluções com menor eficiência técnica, incremento dos riscos residuais, geração de passivos no longo prazo e restrições ao aproveitamento seguro das áreas na fase pós-fechamento.

O presente artigo tem como objetivo discutir os aspectos que pode condicionar a definição do uso futuro, posicionando-o como elemento estruturante ao longo do ciclo de vida dessas estruturas. Para isso, foi desenvolvida uma discussão técnica fundamentada em análise de referenciais regulatórios, boas práticas nacionais e internacionais aplicáveis ao tema, como também, experiência dos autores em trabalho semelhantes. São abordados aspectos técnicos, ambientais e socioeconômicos que influenciam a seleção de alternativas e a sustentabilidade a longo prazo, bem como sua avaliação antecipada pode orientar decisões de projeto, estratégias operacionais e diretrizes de fechamento. Como resultado, o estudo sintetiza os principais fatores condicionantes para a definição do uso futuro e apresenta contribuições para sua incorporação nas fases de planejamento/projeto, operação, fechamento e pós-fechamento, visando soluções seguras, viáveis e com diluição de custos ao longo do ciclo de vida.

ABSTRACT

The increasing stringency of regulatory requirements, together with the evolution of decommissioning and rehabilitation practices for dams and geotechnical structures, has highlighted the need to incorporate a structured assessment of future land use from the earliest stages of project development. However, this discussion is still frequently conducted in isolation or at a late stage, with limited integration into engineering decision-making and operational, economic, and territorial planning. As a result, solutions with lower technical efficiency may be adopted, leading to increased residual risks, the generation of long-term liabilities, and constraints on the safe post-closure use of these areas.

This paper aims to discuss the factors that may influence the definition of future land use, positioning it as a structuring element throughout the lifecycle of geotechnical structures. To this end, a technical discussion was developed based on the analysis of regulatory frameworks, national and international best practices applicable to the subject, as well as the authors' professional experience in similar projects. The paper addresses the technical, environmental, economic, and socioeconomic aspects that influence the selection of future land use alternatives and their long-term sustainability, as well as how their early assessment can support design decisions, operational strategies, and closure planning. As a result, the study synthesizes the main factors governing future land use definition and presents contributions to its integration into the planning/design, operation, closure, and post-closure phases, aiming to support safe, feasible, and cost-effective solutions through the distribution of costs over the lifecycle.

1. INTRODUÇÃO

O planejamento do fechamento e a definição do uso futuro de áreas ocupadas por barragens e estruturas geotécnicas vem ocupando espaço entre as obrigações técnicas e legais dos mineradores. A exigência de Planos de Fechamento, a necessidade de provisão financeira para as ações de descomissionamento e reabilitação, e a incorporação de critérios de segurança de longo prazo às licenças ambientais são exemplos de como o horizonte pós-operacional assumiu maior importância no planejamento do setor. Contudo, ainda que mais exigentes, os requisitos legais não determinam, de forma sistemática, os critérios que devem orientar a avaliação e a seleção da alternativa de uso futuro das áreas, abrindo espaço para abordagens não integradas e de eficiência questionável.

Apesar do avanço regulatório, a definição do uso futuro de áreas ocupadas por barragens e estruturas geotécnicas é, em muitos casos, tratada como etapa final do ciclo de vida, dissociada das decisões de concepção, projeto e operação. Essa abordagem tardia compromete a coerência técnica das possíveis soluções, uma vez que os requisitos geotécnicos, ambientais e construtivos associados ao uso futuro pretendido devem condicionar as decisões de engenharia tomadas antes do encerramento das atividades operacionais, durante o ciclo de vida das estruturas.

A ausência de uma abordagem estruturada e antecipada para a definição do uso futuro gera consequências que se manifestam em diferentes dimensões. Do ponto de vista técnico, soluções de descaracterização e reabilitação podem ser adotadas sem compatibilidade com os requisitos de desempenho geotécnico de longo prazo exigidos pelo uso pretendido, resultando em riscos residuais, dificuldades construtivas e necessidade de intervenções corretivas onerosas. Do ponto de vista econômico, a postergação dessas definições impede a diluição dos custos associados ao fechamento ao longo do ciclo de vida da estrutura, concentrando-os nas fases finais, com potencial de geração de maior ônus financeiro ao empreendimento. Do ponto de vista socioambiental, a falta de diretrizes claras para o pós-fechamento pode restringir o aproveitamento seguro e sustentável das áreas, limitar o alinhamento com as expectativas das comunidades afetadas e comprometer a reintegração paisagística e ecológica das regiões impactadas.

Diretrizes internacionais, como o Guia de Boas Práticas para o Fechamento Integrado de Mina [1], reconhecem que o fechamento deve ser concebido de forma sistemática, considerando de maneira integrada os fatores ambientais, sociais e econômicos desde os estágios iniciais de planejamento. Nesse contexto, o planejamento do fechamento, incluindo os horizontes de curto, médio e longo prazo, deve ser conduzido ao longo de toda a vida útil da mina, assegurando a incorporação contínua desses aspectos no processo de tomada de decisão.

De acordo com o Guia para Planejamento do Fechamento de Mina do Instituto Brasileiro de Mineração [2], o planejamento do fechamento deve ser iniciado ainda na fase de estudo de viabilidade, de forma que as alternativas de uso pós-mineração sejam avaliadas concomitantemente às opções de desenvolvimento do projeto. Essa diretriz, associada ao conceito de “projetar para o fechamento”, baseia-se no entendimento de que a mineração é um uso temporário do solo, que dará lugar a novas formas de utilização no futuro.

Diante desse cenário, o presente artigo desenvolve uma discussão técnica sobre o papel do uso futuro como variável estratégica no planejamento de barragens e estruturas geotécnicas, examinando os fatores condicionantes dessa definição e suas repercussões ao longo das diferentes fases do ciclo de vida. A análise contempla dimensões técnicas, ambientais e socioeconômicas, buscando demonstrar de que forma a antecipação dessas variáveis pode qualificar as decisões de projeto, orientar estratégias operacionais e conferir maior robustez às soluções de fechamento e pós-fechamento.

Embora referências como os guias do ICMM e do IBRAM reforcem a importância da definição do uso futuro como parte fundamental do planejamento do fechamento, este trabalho discute o uso futuro sob a perspectiva do ciclo de vida de estruturas geotécnicas, a partir do conhecimento técnico consolidado na prática profissional. Como contribuição, evidencia que a definição do uso futuro deve ser compreendida como uma variável estratégica capaz de orientar decisões de engenharia desde as etapas de planejamento e projeto, influenciando as estratégias de operação, fechamento e pós-fechamento. Para isso, são discutidos os principais aspectos considerados nessa definição e apresentadas diretrizes gerais para sua incorporação ao longo de todo o ciclo de vida das estruturas.

2. EVOLUÇÃO DO CONTEXTO REGULATÓRIO

O arcabouço legal brasileiro tem se tornado progressivamente mais exigente no que se refere à incorporação do planejamento de fechamento ao longo do ciclo de vida dos empreendimentos minerários. Essa diretriz já se encontra implícita desde a promulgação da Constituição Federal de 1988 [3], que estabelece a obrigação do empreendedor de recuperar as áreas degradadas. A partir desse princípio, entende-se que o fechamento não deve ser tratado como uma etapa isolada, mas sim como um processo contínuo de reabilitação, a ser considerado desde a concepção do empreendimento, orientando decisões de projeto, operação e desativação.

No âmbito específico da mineração, essa evolução foi acompanhada pelo aperfeiçoamento do arcabouço regulatório aplicável ao Plano de Fechamento de Mina (PFM). Inicialmente disciplinado pela Norma Reguladora de Mineração (NRM) nº 20.4, de 2001, o fechamento era tratado de forma geral, com reduzido detalhamento técnico. Posteriormente, o Decreto nº 9.406/2018 [4] representou um marco ao incorporar, entre os aspectos a serem contemplados no fechamento, a definição da aptidão e do propósito para o uso futuro da área, além da recuperação ambiental, da desmobilização das instalações e do monitoramento das estruturas remanescentes. Na sequência, a Lei nº 14.066/2020 [5] ampliou a responsabilidade do empreendedor até o efetivo fechamento da mina, abrangendo a prevenção, mitigação e compensação dos impactos ambientais, a recuperação das áreas degradadas e a consideração do bem-estar das comunidades e do desenvolvimento sustentável.

Em complemento, a Resolução ANM nº 68/2021 [6] revogou a NRM nº 20.4 e estabeleceu novo marco regulatório para o PFM, disciplinando sua elaboração, atualização e execução ao longo da vida útil da mina e determinando que o plano contemple diretrizes para adequação da área ao uso futuro previsto, fundamentadas na caracterização da área, na avaliação de riscos e nas ações de

descomissionamento, reabilitação e monitoramento. Essas diretrizes foram posteriormente consolidadas pelo Decreto nº 10.965/2022 [7], que reafirmou o fechamento e o descomissionamento das instalações como parte integrante da recuperação ambiental do empreendimento.

A evolução do contexto regulatório está associada a múltiplos fatores de natureza territorial, social e econômica. Ao longo dos anos, a expansão urbana ocorreu, em muitos casos, no entorno de áreas mineradas, resultando na crescente proximidade entre os empreendimentos e os centros urbanos. Esse cenário intensificou a interdependência entre as operações minerárias e as comunidades locais, especialmente no que se refere à dinamização econômica, geração de emprego e renda [8]. Paralelamente, houve um aumento significativo na percepção de risco por parte da sociedade, o que, aliado à ampliação dos mecanismos de participação social, como audiências públicas realizadas no âmbito do licenciamento ambiental, processos de consulta às partes interessadas e outros instrumentos de diálogo institucional, leva ao envolvimento da sociedade nas discussões sobre a segurança e o futuro dessas estruturas. Em relação a definição do uso futuro essas iniciativas ainda são incipientes, não existindo exigências legais associadas.

As transformações sociais, territoriais e institucionais foram gradualmente incorporadas aos instrumentos regulatórios, refletindo uma mudança de paradigma na forma como a segurança de barragens e de demais estruturas geotécnicas tem sido tratada. Observa-se um avanço de abordagens buscando-se por modelos preventivos e integrados, que consideram não apenas a estabilidade física das estruturas, mas também seus impactos potenciais em longo prazo, incluindo o período pós-operacional. Nesse contexto, o planejamento do fechamento e a definição de usos futuros passaram a ser cada vez mais relevantes dentro das diretrizes normativas e dos processos de gestão.

O setor de barragens e estruturas geotécnicas no Brasil tem passado por transformações regulatórias nas últimas décadas, intensificadas a partir de eventos de rompimento de barragens, que evidenciaram as consequências de fragilidades no planejamento, na gestão de riscos e no controle operacional dessas estruturas. A resposta regulatória a esses eventos resultou em um conjunto de exigências rigorosas, que consolidam critérios técnicos e procedimentos para o gerenciamento dessas estruturas, incluindo requisitos relacionados ao planejamento de fechamento, à descaracterização e à gestão de riscos em longo prazo.

Documentos e diretrizes internacionais também acompanharam essa evolução, consolidando boas práticas voltadas à gestão segura e sustentável de barragens e estruturas geotécnicas. Entre os principais referenciais, destaca-se o Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos (em inglês, *Global Industry Standard on Tailings Management - GISTM*), amplamente difundido no setor mineral. Esse padrão estabelece diretrizes abrangentes para todo o ciclo de vida das estruturas de disposição de rejeitos, com ênfase na gestão integrada de riscos, na transparência e no engajamento das partes interessadas.

No contexto do fechamento e pós-fechamento, o GISTM [9] reforça a necessidade de incorporar, desde as fases iniciais, avaliações sistemáticas sobre a aptidão futura das áreas, considerando aspectos físicos, ambientais e socioeconômicos, bem como a viabilidade de usos compatíveis com as condições geotécnicas e ambientais

remanescentes. Ademais, o padrão enfatiza a importância do envolvimento contínuo das partes interessadas ao longo de todo o ciclo de vida do empreendimento, incluindo comunidades potencialmente afetadas, órgãos reguladores e demais atores relevantes.

Esse engajamento deve subsidiar a definição de alternativas de uso futuro que sejam não apenas tecnicamente seguras, mas também socialmente aceitáveis e alinhadas às dinâmicas territoriais. Boas práticas associadas a esse processo incluem a realização de estudos de aptidão da área, a integração do planejamento de fechamento às decisões de projeto e operação, e a adoção de abordagens adaptativas que permitam revisar estratégias ao longo do tempo. Dessa forma, documentos internacionais como o GISTM contribuem para consolidar o entendimento do uso futuro como elemento estruturante, orientando decisões mais robustas, transparentes e sustentáveis ao longo do ciclo de vida das estruturas geotécnicas.

3. ASPECTOS A SEREM CONSIDERADOS NA DEFINIÇÃO DO USO FUTURO

A avaliação de alternativas para definição do uso futuro configura-se como um processo técnico multidisciplinar voltado à avaliação das aptidões do território, das necessidades da comunidade e dos objetivos do empreendedor, com o propósito de identificar e selecionar vocações de uso compatíveis com as características e condicionantes das áreas em questão.

Para que essa definição seja tecnicamente fundamentada, é necessário que o estudo de alternativas se inicie por uma contextualização regional, contemplando o empreendimento e sua área de influência a partir de quatro eixos estruturantes: a caracterização ambiental, o diagnóstico socioeconômico, a análise dos instrumentos de planejamento territorial e a avaliação das vocações e aptidões da área. Essa etapa estabelece a base de informações necessária para a identificação de restrições, potencialidades e condicionantes relevantes à proposição e avaliação de alternativas de uso futuro.

A caracterização ambiental contempla aspectos do meio físico e biótico, como geomorfologia, hidrologia, clima, cobertura vegetal e bioma de inserção. Além disso considera o uso e ocupação do solo, a identificação de áreas protegidas, unidades de conservação, elementos de conectividade ecológica e pressões ambientais incidentes. Sempre que possível, o levantamento das condições pré-empreendimento deve ser incorporado como referência para subsidiar a análise de cenários de uso futuro.

O diagnóstico socioeconômico, por sua vez, avalia a estrutura produtiva local, a dinâmica populacional, a infraestrutura disponível e o grau de dependência econômica da atividade minerária, elementos que condicionam tanto as expectativas das comunidades quanto a viabilidade de determinadas alternativas de uso. De maneira complementar, a análise do arcabouço institucional e regulatório aplicável, incluindo planos diretores, zoneamentos, políticas públicas vigentes e restrições legais ao uso e ocupação do solo, delimita o campo de alternativas tecnicamente admissíveis e orienta a proposição de soluções aderentes ao planejamento territorial vigente.

Para a avaliação das vocações e aptidões da área, devem ser considerados iniciativas e programas locais, demandas e carências da população e vetores de transformação territorial, tais como expansão urbana e mudanças na base econômica regional. Esses elementos contribuem para a identificação de alternativas de uso futuro mais aderentes ao contexto regional e às dinâmicas territoriais em curso.

O conjunto dessas informações, deve subsidiar a proposição de potenciais alternativas de uso futuro, as quais devem estar alinhadas aos objetivos de fechamento do empreendimento e ao legado pretendido, considerando a viabilidade técnica e econômica, a possibilidade de fechamento progressivo, as perspectivas de transferência de custódia e os requisitos de monitoramento e manutenção no período de pós-fechamento.

Por fim, a avaliação para definição do uso futuro deve considerar, de forma integrada, aspectos técnicos, ambientais e socioeconômicos. Estes aspectos, avaliados no contexto de implantação e pós-implantação auxiliam na avaliação das alternativas propostas, suportando a tomada de decisão por parte do empreendedor de maneira integrada e defensável. A seguir são apresentados os aspectos e os principais fatores associados a eles, não se restringindo somente aos exemplos citados. Esta avaliação deve ponderar também fatores internos, estratégicos e operacionais do empreendedor, em consonância com o legado pretendido.

3.1 Aspectos Técnicos

Os aspectos técnicos a serem considerados na definição do uso futuro abrangem, entre outros, a estabilidade física, química e biológica, cujos critérios de análise evoluem ao longo das fases de implantação da alternativa.

A estabilidade física compreende o conjunto de obras e intervenções necessárias para garantir a integridade da estrutura em função do uso futuro proposto, avaliadas em termos de complexidade técnica, volume e natureza das intervenções requeridas na etapa de implantação. Essas intervenções devem ser concebidas de modo a preservar a estabilidade física da estrutura e prevenir processos de erosão, arraste e transporte de sedimentos para áreas adjacentes. No contexto pós-implantação, a análise incide sobre a capacidade da alternativa de favorecer a manutenção da estabilidade no longo prazo, considerando aspectos como a geometria final das estruturas, a eficiência dos sistemas de drenagem e de controle do escoamento superficial, a cobertura vegetal estabelecida, bem como, os fatores de segurança associados ao uso definido.

Por sua vez, a estabilidade química contempla o esforço de mitigação, tratamento e remediação necessário para assegurar condições hidrogeoquímicas satisfatórias nas águas superficiais e subterrâneas, solo e substrato até que a área alcance equilíbrio estável. No longo prazo, a avaliação passa a considerar o potencial da alternativa de favorecer a manutenção desse equilíbrio, sendo menos favoráveis aquelas que introduzem fontes de contaminação ou perturbação hidrogeoquímica.

Embora a estabilidade biológica seja um aspecto técnico, em função de sua importância no contexto ambiental, é explorada no subitem 3.2.

3.2 Aspectos Ambientais

As alternativas de uso futuro podem ser avaliadas a partir de diversos aspectos ambientais, a serem definidos conforme as características locais e/ou regionais, além do tipo de estrutura a ser implantada. Entre os principais aspectos podemos citar o impacto sobre o meio físico e biótico, estabilidade biológica e integração paisagística, sendo aplicáveis a diferentes contextos.

O impacto sobre o meio físico e biótico é avaliado de forma prospectiva ao longo das etapas de implantação e pós-implantação do uso futuro. Durante o período de implantação, a análise incide sobre os efeitos negativos esperados em decorrência da execução das obras, tais como movimentação de solo, supressão de vegetação, alteração da drenagem superficial e perturbação de habitats naturais. Em longo prazo, a avaliação considera os impactos negativos inerentes ao novo uso já estabelecido, refletindo a tendência de interferência contínua sobre o meio físico e biótico associada à alternativa implantada.

A estabilidade biológica reflete o quanto a alternativa favorece a recuperação ambiental e a manutenção da integridade da área no longo prazo, considerando o restabelecimento da cobertura vegetal, o retorno e a permanência da fauna e a conectividade ecológica com o entorno.

A integração paisagística está relacionada a compatibilidade visual e ecológica da área com o entorno, considerando a redução de estruturas artificiais e a harmonização com a paisagem local e regional. Sua materialização pode ser favorecida pela adoção de abordagens que utilizem os processos naturais como elemento estruturante da recuperação ambiental, incluindo soluções baseadas na natureza (*Nature-based Solutions*), técnicas de bioengenharia, engenharia natural e outras intervenções que promovam a estabilização das áreas e sua integração ecológica e paisagística. Alternativas que promovem maior integração com o contexto paisagístico são consideradas mais favoráveis, uma vez que contribuem para a requalificação ambiental e para a aceitação social das soluções de fechamento adotadas.

3.3 Aspectos Econômicos

Os aspectos econômicos associados à definição do uso futuro envolvem a avaliação da viabilidade financeira das alternativas propostas ao longo das diferentes etapas de implantação e consolidação do fechamento. Entre eles podemos citar, a forma e o custo de implantação, além do monitoramento e manutenção que serão demandados no pós-fechamento.

O custo de implantação tem como base o volume total de investimentos necessários para viabilizar o uso futuro proposto, sendo mais favoráveis as alternativas que requerem menor aporte de recursos, refletindo sua vantagem econômica relativa. Já a forma de implantação está relacionada a compatibilidade da alternativa com a estratégia de fechamento do empreendimento. Alternativas que visam o fechamento progressivo, por permitir a diluição dos custos ao longo da vida útil do empreendimento, representam a condição mais favorável. Em contrapartida, o fechamento pós-operação pode concentrar investimentos e prolongar obrigações após o encerramento das atividades, sendo a condição menos favorável.

O monitoramento e a manutenção no pós-fechamento representam o conjunto de obrigações associadas ao uso implantado até que seja comprovado o sucesso do fechamento. A definição antecipada do uso futuro e sua incorporação às decisões de planejamento, projeto e operação permitem que as intervenções necessárias sejam implementadas de forma progressiva ao longo da vida útil do empreendimento, reduzindo a necessidade de adequações e investimentos concentrados nas etapas de fechamento e pós-fechamento. Consequentemente, quanto menor o período requerido para monitoramento e manutenção, menor o ônus econômico e o esforço operacional no pós-fechamento.

3.4 Aspectos Socioeconômicos

Os aspectos socioeconômicos constituem uma abrangente dimensão da avaliação de alternativas de uso futuro, podendo ser analisados a partir de fatores como potencial de geração de emprego e renda, atendimento às carências e alinhamento às potencialidades da comunidade, e promoção da saúde e bem-estar da população. Além disso, no horizonte de longo prazo, podem ser consideradas a infraestrutura disponível e a possibilidade de transferência de custódia.

No horizonte do pós-fechamento, avalia-se o potencial de geração de postos de trabalho diretos associados ao novo uso estabelecido, sendo mais favoráveis as alternativas com maior capacidade de absorção de mão de obra local. A geração de renda amplia a perspectiva econômica para além da relação empregatícia, considerando o potencial de geração de receita para o empreendedor, o receptor da área ou a comunidade local por meio de atividades produtivas, serviços e aproveitamento econômico do território.

Em relação às comunidades, as alternativas podem ser avaliadas em função de suas necessidades, verificando se a alternativa atende a carências concretas identificadas na região, e em relação às suas potencialidades, observando o alinhamento da alternativa às vocações, capacidades e características socioeconômicas e culturais da população envolvida. Ademais, deve ser avaliada a contribuição da alternativa para a qualidade de vida da comunidade, abrangendo a redução de riscos à saúde, o acesso a áreas verdes e os benefícios sociais associados ao uso implantado.

A infraestrutura existente, por exemplo, viária e logística, pode representar vantagem ou restrição à implantação do uso futuro proposto. A disponibilidade de acessos adequados pode reduzir custos e prazos de intervenção, ao passo que sua ausência ou inadequação tende a impor condicionantes operacionais, além de aumentar a complexidade da implantação.

A possibilidade de transferência de custódia pode ser avaliada sob a ótica da facilidade do processo de transferência da área ao término das obrigações do empreendedor, considerando a complexidade regulatória envolvida, as condições técnicas e ambientais remanescentes, a necessidade de monitoramento e manutenção, o perfil do receptor previsto e a possibilidade de geração de renda e recursos a partir do uso futuro implantado.

4. DIRETRIZES PARA O USO FUTURO DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS: BOAS PRÁTICAS APLICADAS AO CICLO DE VIDA

O planejamento do uso futuro de estruturas geotécnicas deve transcender a visão de "reabilitação final" para se tornar um componente intrínseco da engenharia durante todo o ciclo de vida. O objetivo é garantir que as estruturas, ao final da operação, tornem-se ativos seguros, estáveis e integrados à paisagem, minimizando esforços e custos na fase de fechamento.

A definição antecipada do uso pretendido para a área é uma variável estratégica determinante, pois direciona o balanço de esforços e recursos desde a fase de planejamento, definindo, por exemplo, se as estruturas serão mantidas como formas de relevo permanentes ou se serão integralmente desmobilizadas (desmontadas) ao final da operação. Estabelecer este cenário desde a etapa inicial e acompanhá-lo durante todas as fases de evolução é fundamental para a sua viabilidade técnica e econômica.

Nesse contexto, a implementação de ações progressivas que garantam a estabilidade física, geoquímica e biológica no longo prazo é mandatória. Sendo assim, seguem abaixo diretrizes que auxiliam a materialização do uso futuro em cada uma das fases do ciclo de vida das barragens e pilhas de estéril e/ou rejeito:

4.1 Fase de Planejamento/Projeto: O Conceito de "Projetar para o Fechamento"

A fase de planejamento da estrutura e desenvolvimento de seu projeto corresponde ao momento em que as decisões de engenharia devem ser norteadas pelo estabelecimento das características intrínsecas das estruturas, antecipando os desafios do pós-fechamento. Para garantir a viabilidade do uso futuro pretendido, esta etapa deve contemplar:

- Caracterização Rigorosa e Enquadramento Legal

  Realização da caracterização geoquímica e física dos materiais em estrita consonância com a legislação e as normas técnicas aplicáveis. O primeiro passo consiste em determinar se o material é perigoso ou não perigoso, considerando suas propriedades físicas, químicas e biológicas relevantes, de modo a subsidiar a definição das medidas de manejo e controle necessárias. É fundamental a avaliação do potencial de reatividade geoquímica dos materiais (PAG - Potencialmente Gerador de Ácido ou NAG - Não Gerador de Ácido, ou enquadramento em outros aspectos indicados pela legislação), permitindo prever o comportamento físico-químico global da estrutura.

- Investigação Geoquímica Avançada

  Dependendo dos resultados iniciais, a análise não deve se limitar aos testes estáticos para determinação do potencial de geração de acidez. É fundamental utilizar testes cinéticos para prever as taxas de oxidação e lixiviação a longo prazo, conforme preconizado pelo Guia Global de Drenagem Ácida de Rocha (*Global Acid Rock Drainage Guide* – GARD) [10]. Caso o material seja classificado como PAG, o projeto deve integrar obrigatoriamente estratégias de segregação, impermeabilização e sistemas de cobertura superficial.

- Estabelecimento da Linha de Base (*Background*)

Iniciar, ainda no projeto, o levantamento e a especificação dos parâmetros de referência ambientais (físicos, químicos e bióticos) da área. A consolidação desta linha de base é indispensável para que, nas fases futuras, seja possível comparar o desempenho da estrutura com o estado original, validando a eficácia das medidas de controle.

- Projeto Orientado ao Fechamento (*Design for Closure*)

Desenvolver a geometria final observando a inclinação e altura dos taludes, bem como a largura das bermas. O projeto deve priorizar a redução da superfície de contato, principalmente quando os materiais possuem características reativas. Taludes com alturas de bancada reduzidas e ângulos suavizados (abatidos) são essenciais para minimizar a difusão de oxigênio e a infiltração de água, principais catalisadores da drenagem ácida.

- Impermeabilização Estratégica da Fundação

Avaliação criteriosa da necessidade de impermeabilização da base, considerando as características dos rejeitos/estéreis e as condições hidrogeológicas locais, a fim de evitar o carreamento de lixiviados e a consequente contaminação do solo e aquíferos.

- Viabilidade Executiva de Coberturas

A definição da inclinação global, como também, da largura das bermas deve garantir a acessibilidade para aplicação mecanizada de sistemas de impermeabilização superficial. Taludes excessivamente íngremes podem inviabilizar a instalação de sistema de cobertura, comprometendo o isolamento dos materiais reativos.

- Drenagem Integrada

Os sistemas de drenagem superficial devem ser projetados de forma integrada à geometria final, evitando a concentração de fluxo sobre a estrutura e garantindo a integridade do sistema de impermeabilização no que se refere aos processos erosivos na etapa de pós-fechamento.

- Gestão Estratégica

O projeto deve prever, quando necessário, o isolamento dos materiais reativos no núcleo da estrutura, envolvidos por camadas de material inerte, criando uma barreira física e química perene.

4.2 Fase de Operação: Fechamento Progressivo e Gestão Ativa

A fase de operação representa a materialização das premissas de projeto, sendo o período crítico para estabelecer as condições de contorno do uso futuro e mitigar a formação de passivos ambientais. Nesta etapa, a estrutura deve ser gerida não apenas como um “depósito”, mas como um ativo em constante processo de reabilitação. É necessário considerar:

- Fechamento Progressivo e Reabilitação Antecipada

Execução sistemática da cobertura e revegetação de taludes e bermas assim que atingirem suas cotas definitivas. Esta prática reduz a superfície de exposição ao oxigênio e à água, minimiza a erosão e antecipa a integração da estrutura com o entorno.

- Segregação Geoquímica em Tempo Real

Implementação de protocolos de disposição controlada baseados na classificação dos materiais. Garantir que materiais PAG sejam encapsulados em zonas de baixa permeabilidade, enquanto materiais NAG sejam estrategicamente reservados para as camadas de proteção superficial e substratos de cobertura. Sempre que tecnicamente aplicável, os sistemas de drenagem também devem ser concebidos de forma segregada, evitando a mistura entre águas provenientes de materiais com diferentes características geoquímicas e favorecendo seu adequado gerenciamento.

- Validação via Testes de Campo (Células-Teste)

Instalação e monitoramento de células experimentais em escala real para validar o desempenho dos sistemas de cobertura projetados (barreiras capilares, argilosas ou sintéticas). O foco deve ser a calibração dos parâmetros de compactação e porosidade frente às condições climáticas locais.

- Monitoramento e Calibração da Linha de base

Estabelecimento de uma rede de monitoramento robusta (piezometria, qualidade de água e sensores de umidade no solo) para comparação contínua dos dados operacionais com a linha de base (*background*). Esta análise permite detectar desvios precoces e ajustar as estratégias de controle antes que se tornem passivos críticos.

- Protocolos de Manutenção Preventiva

Estabelecimento de rotinas de conservação para sistemas de drenagem, controle de processos erosivos e integridade da cobertura vegetal. A manutenção ativa durante a operação garante que as estruturas de controle cheguem à fase de fechamento com pleno desempenho funcional.

4.3 Fase de Fechamento: Implementação dos Sistemas de Controle

A fase de fechamento marca a transição definitiva da estrutura de um estado operacional para um estado inativo, onde a segurança e a estabilidade devem ser mantidas com o mínimo de intervenção humana. O foco principal é o isolamento definitivo dos materiais reativos e a configuração de sistemas que suportem as condições ambientais de longo prazo, podendo elencar:

- Implementação de Sistemas de Cobertura Final

Execução de barreiras físicas projetadas para impedir ou minimizar o fluxo de contaminantes.

- Gerenciamento de Águas Superficiais e Resiliência Climática

Construção e adequação de canais de drenagem, vertedouros e bacias com critérios de tempo de recorrência (TR) adequados e consonantes com o estabelecido pela legislação vigente ou fundamentados em análises de risco rigorosas (conforme o GISTM). O objetivo é garantir que a estrutura suporte eventos climáticos extremos sem comprometer a integridade dos seus componentes.

- Descaracterização e Estabilização Química

Realizar o tratamento de plumas de contaminação remanescentes e a proteção definitiva de acessos ou galerias que possam permitir a entrada de oxigênio ou água na estrutura. Esta ação é vital para cessar os processos de oxidação em pilhas e barragens PAG.

- Conformação do Relevo Final (*Landform Design*)

Ajuste final da topografia para garantir a harmonia com a paisagem local e favorecer a drenagem natural, minimizando pontos de acumulação de água que possam gerar infiltrações indesejadas ou instabilidades geotécnicas.

- Descaracterização e Estabilização Química

Tratamento de possíveis plumas de contaminação remanescentes e impermeabilização definitiva de qualquer via de entrada de oxigênio ou água no interior das estruturas PAG, interrompendo o ciclo de oxidação.

- Concretização do Uso Futuro (Cenário de Manutenção)

Caso a estrutura seja mantida, deve-se proceder apenas com adequações finais na infraestrutura já implantada progressivamente. Inclui a adequação de acessos para monitoramento, a conclusão do plantio definitivo e a instalação de elementos remanescentes de suporte à nova finalidade da área. As intervenções devem ser mínimas, servindo apenas para consolidar a transição.

- Concretização do Uso Futuro (Cenário de Desmonte/Remoção)

Caso a estratégia preveja a remoção, esta fase compreende a escavação e realocação segura de materiais para áreas de disposição final licenciadas. O foco reside na recuperação total da área original, assegurando a descontaminação do solo e a reabilitação topográfica/ hidrológica próximo à condição original, de modo a viabilizar o uso futuro sem a presença da estrutura implantada para viabilizar as atividades minerais.

4.4 Fase de Pós-Fechamento: Custódia de Longo Prazo

A fase de pós-fechamento compreende o período em que a estrutura (ou a área recuperada) deve demonstrar desempenho em conformidade com o uso futuro estabelecido (reflorestamento, industrial, recreativo, etc.). O foco reside na verificação da estabilidade e na garantia de que o ativo permaneça sustentável, seguro e integrado ao meio sem demandar intervenções constantes, viabilizando a transferência de custódia. Nesta fase deve-se realizar:

- Monitoramento

Acompanhamento contínuo da integridade da estrutura, com orientações específicas a depender do cenário. Caso a estrutura seja mantida, verifica-se os recalques, nível freático interno, a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, ou outro parâmetro definido, além do desempenho da cobertura, caso aplicável. Em caso de remoção, realiza-se o monitoramento da estabilidade do solo e da regeneração da cobertura vegetal na área, garantindo que não ocorram processos erosivos.

Além do acompanhamento da condição física das estruturas/áreas, o monitoramento ambiental deve ser executado, abrangendo as particularidades de cada empreendimento e localidade.

- Gestão por Indicadores de Sucesso

Estabelecimento de critérios para intervenção baseados em dados técnicos. Se a qualidade da água de drenagem, as taxas de infiltração ou os índices de erosão excederem os limites estabelecidos em relação à linha de base original, planos de contingência devem ser acionados de imediato para correções.

- Manutenção e Sustentabilidade de Ativos

Garantia de que a responsabilidade pela conservação da vegetação, canais de drenagem e cercamentos esteja claramente definida e os recursos estejam disponíveis (via, por exemplo, Seguro Garantia). A custódia deve assegurar que o uso futuro planejado seja resiliente.

- Transferência de Custódia e Encerramento de Responsabilidade

Formalização da entrega da área para o novo propósito, se for o caso. Esta etapa exige a validação final de que todos os indicadores de sucesso do Plano de Fechamento foram atingidos, permitindo que a estrutura (ou a área reabilitada) seja integrada definitivamente ao território sob gestão do novo usuário ou da autoridade competente.

5. CONCLUSÕES

Reconhecer o uso futuro como variável estratégica de engenharia e não apenas como requisito ambiental ou regulatório é necessário para elevar a qualidade técnica das soluções de fechamento e para assegurar que as estruturas reabilitadas cumpram, no longo prazo, os critérios de segurança, desempenho e utilidade para os quais foram planejadas.

Nesse sentido, o sucesso do uso futuro de estruturas geotécnicas reside na antecipação estratégica. A adoção de boas práticas internacionais, como o GISTM e o Guia GARD, reforça que o fechamento não deve ser encarado como o encerramento de um processo, mas como um processo a ser considerado desde a concepção do projeto, incorporando o conceito de “projetar para o fechamento”.

A manutenção da estabilidade física, a integridade hidrogeoquímica e a recuperação biológica constituem os pilares fundamentais que sustentam a evolução da estrutura para uma condição adequada. Somente através dessa visão integrada e de longo

prazo é possível viabilizar um uso futuro que seja, de fato, seguro, sustentável e plenamente integrado ao ambiente local.

Por fim, destaca-se que as diretrizes apresentadas possuem caráter geral e buscam consolidar princípios aplicáveis ao planejamento do uso futuro de estruturas geotécnicas ao longo de seu ciclo de vida, não contemplando todas as especificidades inerentes aos diferentes tipos de empreendimentos minerários. Dessa forma, sua aplicação deve considerar as particularidades técnicas, ambientais, operacionais e territoriais de cada contexto, podendo ser complementada e adaptada em estudos futuros ou aplicações específicas, de modo a atender às demandas e condicionantes de cada empreendimento.

6. PALAVRAS-CHAVE

Uso Futuro, Ciclo de Vida, Estruturas Geotécnicas, Planejamento Estratégico, Reintegração Paisagística.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (ICMM). Integrated Mine Closure - Good Practice Guide, 3rd Edition. Londres, 2015. Disponível em: https://www.icmm.com/integrated-mine-closure. Acesso em: 8 maio 2026.

[2] SÁNCHEZ, Luis Enrique. Guia para o planejamento do fechamento de mina. Brasília: IBRAM, 2013. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2013/05/00004091-2.pdf. Acesso em: 8 maio 2026.

[3] BRASIL. “Constituição da República Federativa do Brasil: promulgada em 5 de outubro de 1988”, anais jurídicos da legislação brasileira, Direito Constitucional, v. 1, Brasília.

[4] BRASIL. Decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018. Regulamenta o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração), a Lei nº 6.567, de 24 de setembro de 1978, a Lei nº 7.805, de 18 de julho de 1989, e a Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 13 jun. 2018.

[5] BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração), e outras disposições. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 1 out. 2020.

[6] Agência Nacional de Mineração (ANM). Resolução ANM nº 68, de 30 de abril de 2021. Dispõe sobre as regras referentes ao Plano de Fechamento de Mina (PFM) e revoga as Normas Reguladoras da Mineração nº 20.4 e nº 20.5. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 5 maio 2021.

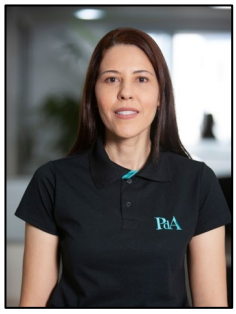
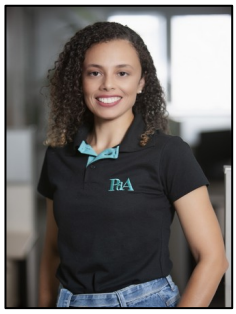
[7] BRASIL. Decreto nº 10.965, de 11 de fevereiro de 2022. Altera o Decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018, que regulamenta o Código de Mineração. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 14 fev. 2022.

[8] CARMO, Ednalva Lima. A mineração e a produção do espaço urbano em Canaã

dos Carajás-Pará. Revista Tocantinense de Geografia, *[S. l.]*, v. 12, n. 28, p. 139–153, 2023. DOI: 10.20873/rtg.v12i28.16834. Disponível em: https://periodicos.ufnt.edu.br/index.php/geografia/article/view/16834. Acesso em: 7 jul. 2026.

[9] GLOBAL TAILINGS REVIEW. Padrão global da indústria para a gestão de rejeitos. Londres, 2020. Disponível em: https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-tailings-standard_spreads_PT.pdf. Acesso em: 8 maio 2026.

[10] NTERNATIONAL NETWORK FOR ACID PREVENTION (INAP). *Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide)*. Vancouver: INAP, 2014. Disponível em: https://www.inap.com.au/gard-guide/. Acesso em: 7 jul. 2026.

	**Carine LIMA** Graduada em Engenheira Ambiental, em 2024, pela Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Carine passou a compor o time da Pimenta de Ávila Consultoria em 2025, com participação em projetos multidisciplinares, incluindo estudo de avaliação de alternativas de uso futuro para o fechamento de estruturas geotécnicas.
	**Giani ARAGÃO** Engenheira ambiental geotécnica, 21 anos de experiência em consultoria. Atuação em gestão de segurança, risco e emergência de barragens, fechamento de mina, estruturas geotécnicas e empreendimentos industriais. Liderança de equipes e projetos multidisciplinares, incluindo soluções de engenharia conceitual a executivo, metodologia de uso futuro, revegetação, monitoramento e estimativa de custos.
	**Maíra REIS** Engenheira ambiental geotécnica, com mais de 8 anos de experiência em consultoria voltada a estruturas geotécnicas dos setores de mineração, energia e indústria. Atua em projetos multidisciplinares, como em estudos de alternativas, avaliação de interferências, avaliação e mitigação de impactos, modelagens com foco ambiental e planos de fechamento. Possui ampla experiência em gestão de segurança, riscos e emergências associadas a estruturas geotécnicas.

Criação de volume espera em reservatório fio d'água para eliminar hidropicos - Experiência do Complexo Belo

Sandro Deivis dos Santos
Wady Charone Junior
Angelo Luiz de Franceschi

Norte Energia S. A.

RESUMO

A gestão de vazão em uma usina hidrelétrica é essencial para garantir a eficiência operacional e segurança, especialmente em empreendimentos de grande porte, como as hidrelétricas do Complexo Belo Monte operadas pela Norte Energia S.A.

Além dessa necessidade, na região onde está instalado o complexo Belo Monte, a população ribeirinha no TVR – Trecho de Vazão Reduzido – do rio vinha notando que o comportamento dele havia se alterado, não só pela menor vazão no período úmido que vai de novembro a maio na região, mas principalmente pelas variações dessa vazão ao longo da semana e até mesmo ao longo do dia e diziam não “conhecer mais o rio”.

Diante do fato a gestão da operação do Complexo Belo Monte viabilizou junto a ANA – Agência Nacional de Águas uma flexibilização no NA – Nível D’água – do reservatório principal do complexo – reservatório Xingu – para que fosse possível alocar um volume de espera, mesmo com a característica “fio d’água” dele.

A Norte Energia vem praticando essa alocação e ocupação do volume de espera desde o período úmido de 2023 e essas oscilações, também denominados “hidropicos”. Observamos que esse fenômeno não acontece mais e em julho de 2024 a alteração foi oficialmente estabelecida através da divulgação da nova outorga de uso da água ANA-1522-2024.

Assim a Norte Energia cumpre seu papel de ofertar energia ao SIN nos dias úteis, recolhendo no fim de semana e atende aos anseios da população ribeirinha que voltou a “conhecer” o rio novamente.

PALAVRAS-CHAVE

Volume de Espera
Oscilações
Hidropicos
Reservatório Xingu
TVR – Trecho de Vazão Reduzida.

1.0 INTRODUÇÃO

A usina Belo Monte é a maior usina hidrelétrica brasileira com 11.000MW de potência instalada. O complexo Belo Monte conta ainda com a UHE Pimental de 233MW totalizando uma potência total de 11.233MW.

O complexo é formado por dois reservatórios do tipo fio d'água e consistiu em aproveitar uma queda natural na região do rio Xingu em Altamira no estado do Pará, conhecida como Volta Grande do Xingu.

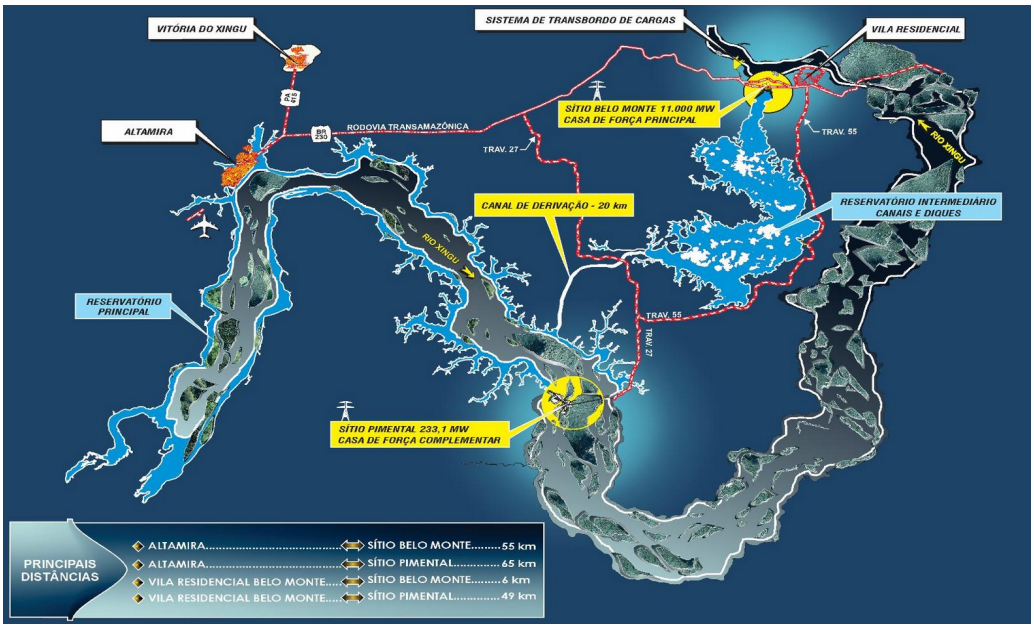


Figura 1 – Arranjo físico do Complexo Hidrelétrico Belo Monte

Com a implantação do empreendimento, criou-se uma nova configuração no rio Xingu, pois agora no reservatório Xingu há um Canal de Derivação com a finalidade desviar parte da vazão afluente natural para o reservatório Intermediário possibilitando a geração de energia na UHE Belo Monte e parte da vazão segue pelo rio até a UHE Pimental e a partir daí, no leito natural do rio até o encontro com o canal de fuga da UHE Belo Monte, esse último trecho que ficou com menor vazão de água, em relação a vazão afluente, é denominado TVR – Trecho de Vazão Reduzida.

O complexo Belo Monte possui em sua outorga de uso da água (outorga ANA 1522 de 24 de junho de 2024) dois compromissos fundamentais de vazão a ser mantida na região do empreendimento, a saber:

1. Manter uma vazão mínima de 300m³/s a cada dois dias para o reservatório Intermediário, podendo ser realizada por pulso, e;
2. Manter uma vazão média mínima mensal conforme os hidrogramas apresentados na tabela a seguir:

ANEXO III - VAZÕES MÉDIAS A SEREM MANTIDAS NO TRECHO DE VAZÃO REDUZIDA (TVR), EM M³/S

Hidrograma	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
A	1100	1600	2500	4000	1800	1200	1000	900	750	700	800	900
B	1100	1600	4000	8000	4000	2000	1200	900	750	700	800	900

Figura 2 – Hidrogramas conforme outorga ANA 1522 de 24 de junho de 2024

É importante salientar que na UHE Belo Monte não há vertedouro, ou seja, a água do reservatório Intermediário só tem um ponto de saída que é através da vazão turbinada na UHE Belo Monte. O vertedouro do complexo se situa na UHE Pimental e está distante 100km da UHE Belo Monte subindo o leito do rio.

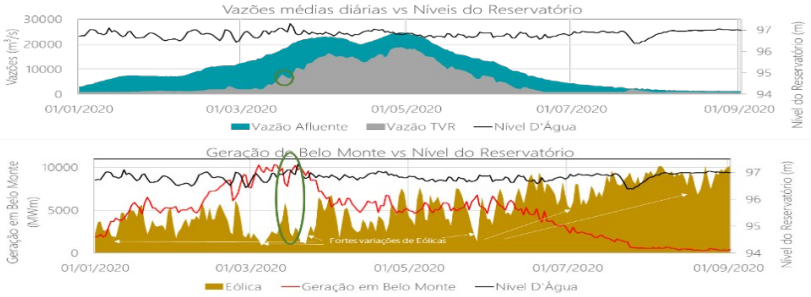
O planejamento energético aplicado ao complexo Belo Monte vinha resultando em flutuações mais acentuadas de nível no TVR, as quais foram apontadas pelos moradores ribeirinhos da Volta Grande do Xingu, denotando diferenças no comportamento do rio.

As subidas e descidas repentinas provocadas pelo despacho energético planejado e aquele executado em tempo real vão contra o comportamento natural do rio. Na comunidade científica essas oscilações são conhecidas como “Hidropico”.

Mediante a análise dos hidrogramas naturais do rio Xingu antes da implantação da UHE, é possível observar que o rio tem seus hidropicos naturais; porém, o despacho energético vinha levando o Complexo Belo Monte a gerar hidropicos artificiais no Trecho de Vazão Reduzido, provocando comportamentos da vazão a jusante (vazão defluente no TVR) diferente do comportamento a montante (vazão afluente ao Reservatório Xingu). Esses eventos ocorrem em virtude de a usina não possuir capacidade de armazenamento da água não absorvida pela UHE Belo Monte, tendo que destiná-la para o TVR, levando ao aumento da vazão nesse trecho. No entanto, caso seja solicitado à UHE Belo Monte gerar mais energia, é necessário reduzir a vazão do TVR para destinar essa vazão para geração na UHE Belo Monte.

Dessa forma apresentamos a seguir constatações observadas ao longo de três anos de operação a plena carga da usina e o que pôde ser feito para evitar esse comportamento.

Os gráficos a seguir (Figura 3) são semelhantes nos três anos analisados (2020, 2021 e 2022), e em cada um foi destacado a ocorrência de hidropicos não naturais. Nos três anos mostrados podemos ver movimentos de hidropicos naturais da vazão afluente (área verde), mas também hidropicos não naturais e maiores na vazão defluente (área cinza). Em todos os gráficos a linha preta representa o NA do Reservatório Xingu. No gráfico de geração fazemos uma comparação entre a geração da UHE Belo Monte e a geração de fontes eólicas.



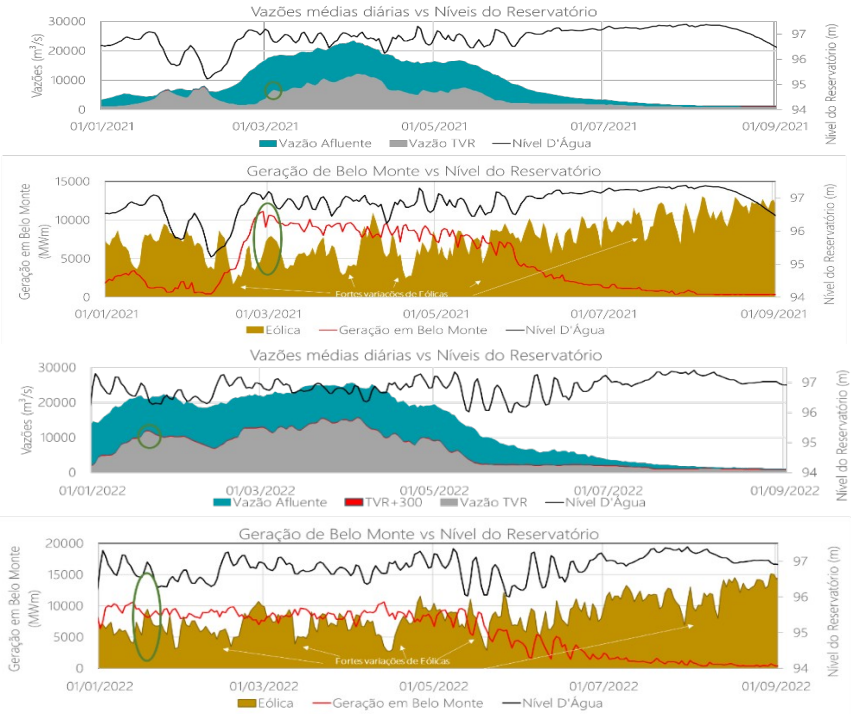


Figura 3: Vazões medidas diárias e os níveis do Reservatório associado à geração da UHE Belo Monte.

A seguir é apresentado o retrato de um período específico do ano de 2022, cujo fenômeno é o mesmo para todos os casos (Figura 4).

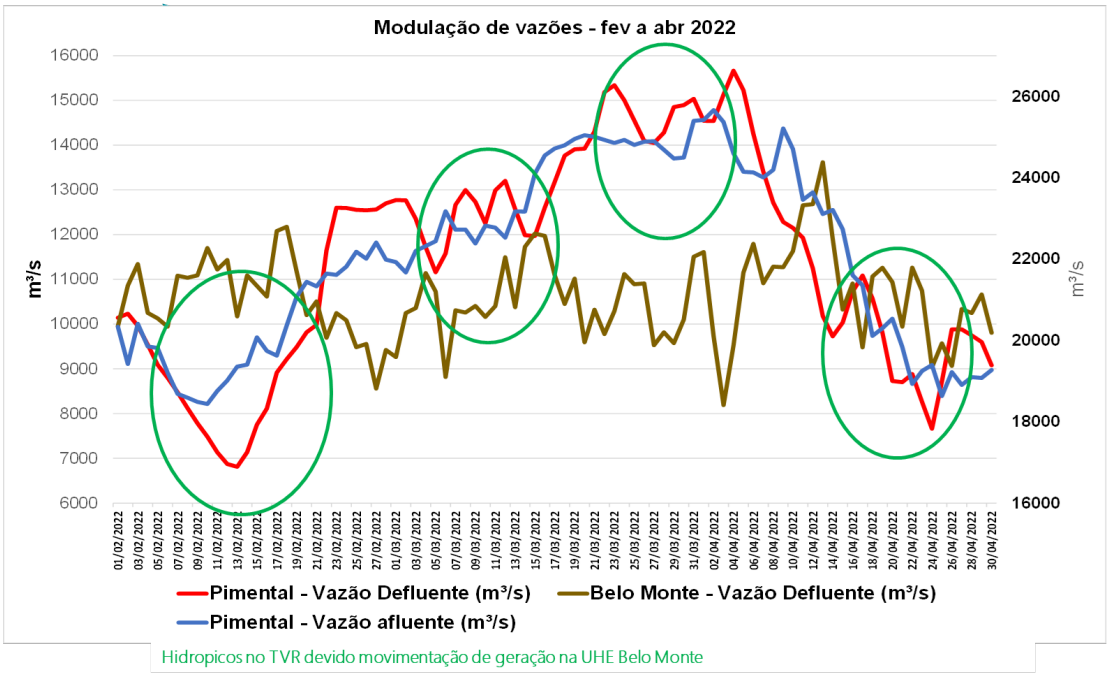


Figura 4: Modulações de vazões no período de fevereiro a abril de 2022.

No período mostrado acima (01/02 a 30/04/2022) deve-se considerar que as variações nas vazões defluentes na UHE Belo Monte são motivadas por maior ou menor geração em função do despacho energético solicitado pela ONS. No primeiro evento no início de fevereiro de 2022 há um aumento na geração da UHE Belo Monte (linha marrom) e a afluência está reduzindo (linha azul), porém a redução na vazão do TVR ainda é maior (linha vermelha), a vazão afluente

cai de 20.000m³/s para 18.500m³/s em 10 dias enquanto a vazão no TVR é reduzida de 10.000m³/s para 7.000m³/s, o dobro da redução da afluência, mas mantendo-se dentro dos limites preconizados no hidrograma B para o período em questão.

Logo em seguida e em 10 dias, a geração da UHE Belo Monte é reduzida, a vazão defluente na UHE Belo Monte cai de 12.000m³/s para 8.500m³/s, e a vazão afluente volta a subir, consequentemente é necessário aumentar a vazão no TVR. Do dia 13 ao dia 23/02 a vazão afluente sobe de 18.500m³/s para 22.000m³/s e a vazão no TVR salta de 7.000m³/s para 12.500m³/s.

Os reservatórios do Complexo Belo Monte são de característica “Fio d’água”, ou seja, não acumulam água. Assim, o que chega tem que sair, quer seja através da geração da UHE Belo Monte, quer seja pelo vertedouro da UHE Pimental.

Foi feita uma simulação sobre esse mesmo cenário de como seria, se a vazão afluente fosse aproveitada seguindo a regra do projeto, qual seja, “a vazão afluente é destinada para cumprir o hidrograma (vazão média mínima mensal a ser mantida no TVR) e o excedente deve ser direcionado para geração na UHE Belo Monte”, o gráfico da Figura 5 mostra esta situação.

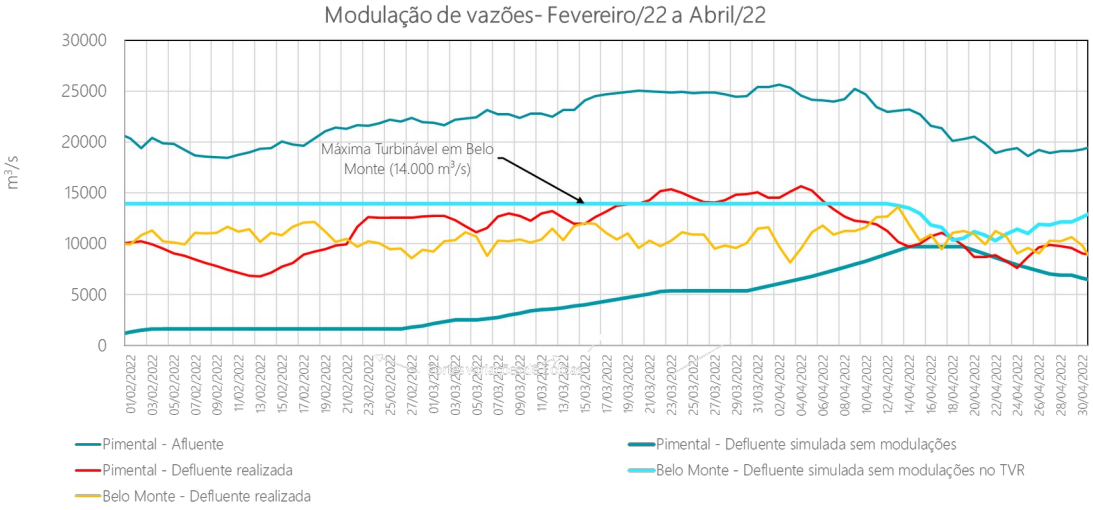


Figura 5: Modulação de vazões (período de fevereiro a abril/2022).

Observa-se na Figura 5 que a curva superior, a curva amarela e a curva vermelha são as mesmas do gráfico anterior, respectivamente, “Pimental-afluente”, “Pimental-Defluência realizada” e “Belo Monte-Defluência realizada”, as outras duas curvas constituem a simulação se a regra proposta fosse seguida.

Nota-se que a vazão “Pimental-Defluente simulada sem modulações” não possui hidropicos, sejam eles naturais, como podemos observar na curva “Pimental-afluente”, e muito menos hidropicos não naturais. Isso ocorre porque todo o excedente àquela vazão necessária para cumprimento do hidrograma B foi desviado para a geração na UHE Belo Monte. A defluência simulada começa a cair exatamente quando a afluência também inicia, assim consegue-se estabelecer uma harmonia no comportamento entre as duas grandezas principais, vazão afluente e vazão no TVR.

2.0 OPERAÇÃO DA USINA NO PRIMEIRO TRIMESTRE DE 2023

Com base nas informações recebidas pela área socioambiental que faz a escuta ativa na região do TVR, além de acompanhar, monitorar e avaliar outras variáveis socioambientais e visando o estabelecimento de melhorias e potencial diminuição da ocorrência e suavização de hidropicos, a área de operação começou então no início do ano de 2023 a fazer uma operação de criação de volume de espera no Reservatório Xingu (RX). Apesar do reservatório ser do tipo fio d'água avaliamos que seria possível para o curto espaço de tempo alocar um "volume de espera" nesse reservatório de forma a não transferir para o TVR oscilações na geração da UHE Belo Monte, as quais seriam absorvidas em ambos os reservatórios.

O "Volume de espera" consiste em fazer um rebaixamento no nível de água do RX de forma a absorver aumentos de vazões ou até mesmo modulação de geração na usina. O Volume de Espera é sistematicamente utilizado pelo ONS nas principais bacias do país, notadamente da bacia do rio Paraná para evitar enchentes e recuperar os grandes reservatórios da cascata (Furnas, Itumbiara, Emborcação etc.).

Para o caso do complexo Belo Monte foi verificado que o despacho energético necessita de mais geração na UHE Belo Monte durante a semana e menos geração nos finais de semana, principalmente pelo menor consumo, mas também pelo uso de outras fontes renováveis e intermitentes (eólica e solar), motivo pelo qual não conseguimos praticar a regra ideal já demonstrada.
A Figura 6 demonstra o comportamento das vazões do Complexo Belo Monte no período modulado considerando diferenças nos despachos a serem realizados durante a semana e aos finais de semana.

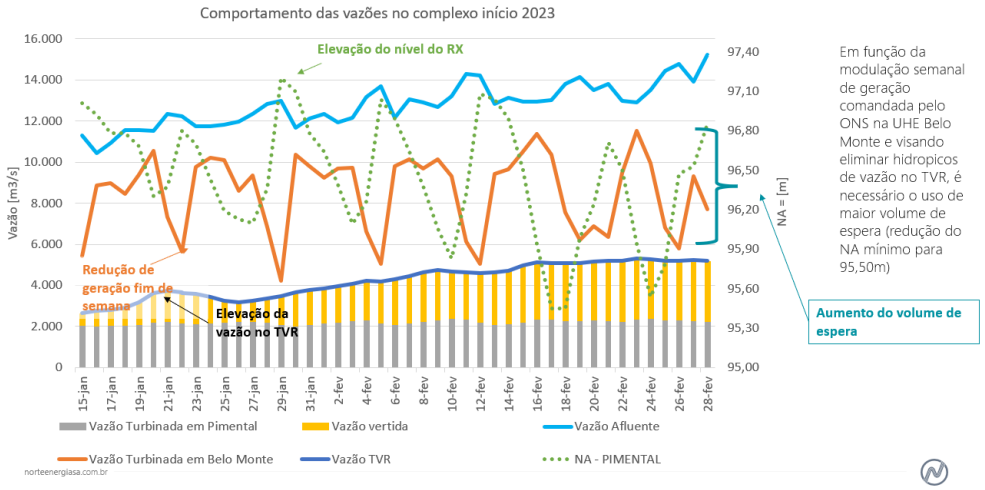


Figura 6: Comportamento das vazões no Complexo Belo Monte, período de 15 de janeiro a 28 de fevereiro/2023.

Analisando o gráfico (Figura 6) observa-se a ocorrência de hidropicos naturais na "Vazão Afluente" que não são refletidos na mesma proporção na "Vazão TVR", mostrando uma oscilação mais comportada e de menor amplitude. As maiores variações são notadas exatamente na modulação da geração da UHE Belo Monte; maior nos dias úteis e menor nos fins de semana, e consequentemente há variação no nível do reservatório com movimento descendente nos dias úteis e ascendentes nos fins de semana.

Essa variação do NA Montante do Reservatório Xingu não afeta a região a montante. Um ponto de atenção é a captação de água da cidade de Altamira, mas essa é flutuante e capta água na cota 92,40m, portanto sem previsão de sofrer quaisquer consequências.

Adicionalmente como relatado no início, os monitoramentos necessários ao acompanhamento deste tipo de operação (com alocação de volume de espera) foram mantidos, uma vez que a abrangência espacial e a gama de parâmetros analisados são suficientes para dar respostas assertivas quanto às respostas das questões socioambientais frente a dinâmica de variação do NA de Montante do RX.

A operação de volume de espera foi informada à ANA face a necessidade de tentativas de minimizar o aparecimento de hidropicos e foi validada pela mesma com a publicação da nova outorga do uso da água de nº 1522 de 24 de julho de 2024 onde estabelece o novo nível mínimo operacional em 95,50m, nível esse que anteriormente era de 96,70m. Agora o complexo conta com uma capacidade de variação de 1,50m entre seu NA máximo e NA mínimo operacional.

3.0 CONCLUSÕES

A operação de uma usina hidrelétrica em sua fase inicial de operação sempre passará por adaptações no sentido de buscar o melhor relacionamento com as populações e o meio ambiente afetado e atender à geração de energia, de forma a cada dia minimizar seus impactos e estar cada vez mais harmoniosa com o anseio de todos. Após a adoção do volume de espera em um reservatório fio d'água, especificamente no Complexo Belo Monte, cessaram as reclamações de "desconhecimento do rio", visto que agora seu comportamento busca refletir aquilo que acontecia naturalmente nos períodos do "Inverno Amazônico" na região da Volta Grande do Xingu e a UHE Belo Monte continua firmemente atendendo às necessidades do SIN em seu momento de maior possibilidade de produção, contribuindo para o atendimento da carga e para a recuperação dos reservatórios de acumulação, nas demais bacias hidrográficas onde estão situados.
A medida foi fundamental para atender aos anseios da população ribeirinha que vive a jusante da UHE Pimental, pois reclamavam que não conheciam mais o rio. Isso em função das oscilações que eram provocadas no TVR ao se reduzir geração na UHE Belo Monte. Com a adoção do volume de espera essas oscilações não acontecem mais e as reclamações não se verificam mais, bem como a população voltou a conviver com uma condição anterior a implantação do empreendimento. A Norte Energia dessa forma cumpre seu papel social e ambiental na região do empreendimento.

4.0 BIBLIOGRAFIA

[1] Procedimentos de Rede do ONS – Módulos 3 e 5 revisões em vigor
[2] Almeida, R. M., Hamilton, S. K., Rosi, E. J., Barros, N., Doria, C. R., Flecker, A. S., ... & Roland, F. (2020). Hydropeaking operations of two run-of-river mega-dams alter downstream hydrology of the largest Amazon tributary. Frontiers in Environmental Science, 8, 120.
[3] Ashraf, F. B., Haghighi, A. T., Riml, J., Alfredsen, K., Koskela, J. J., Kløve, B., & Marttila, H. (2018). Changes in short term river flow regulation and hydropeaking in Nordic rivers. Scientific reports, 8(1), 17232.

[4] Bartoň, D., Brabec, M., Sajdlová, Z., Souza, A. T., Duras, J., Kortan, D., ... & Šmejkal, M. (2022). Hydropeaking causes spatial shifts in a reproducing rheophilic fish. *Science of the Total Environment*, *806*, 150649.

Minicurrículos

1. SANDRO DEIVIS DOS SANTOS

Engenheiro eletricista graduado pela PUC-MG em 1994 com pós graduação em Sistemas Elétricos de Potência pela UNIFEI em 2007 e MBA em Gestão empresarial pelo SENAC em 2018, com mais de 37 anos de atuação no setor elétrico brasileiro foi operador de instalações e de centros de controle, engenheiro e coordenador na CEMIG, Gerente de Planejamento e Manutenção na NEOENERGIA, Engenheiro de Tempo Real do CNOS no ONS, Engenheiro, Gerente e Diretor de Consórcios na VALE e ALIANÇA ENERGIA, Diretor de Operação na CEI – Companhia Energética Integrada, Engenheiro Consultor, Gerente de Planejamento, Análise e Estudos da Operação e atualmente Superintendente de Operação na **Norte Energia S.A.** atuando no planejamento energético, na operação em tempo real e na análise da operação das UHE Belo Monte e Pimental.



sandrosantos@norteenergiasa.com.br
(93) 98803-8410

2. WADY CHARONE JUNIOR

Wady Charone Júnior é Engenheiro Eletricista, graduado pela Universidade Federal do Pará (UFPa), com Mestrado em Sistema Elétrico de Potência pela Universidade de Brasília (UnB) e pós-graduação em Gestão Empresarial – MBA - Desenvolvimento de Altos Executivos em Administração pela Fundação Instituto de Administração (FIA – USP); com curso profissionalizante pela UCEL Universidade Corporativa – Conteúdo da HARVARD BUSINESS PUBLISHING, curso profissionalizante para Desenvolvimento de Competências Gerenciais – PROGRAMA FOCCUS pela Universidade da Experiência de São Paulo – UEXP/ Universidade Corporativa da Eletrobras UNISE. Fez curso de formação para Conselheiros de Administração pelo Instituto Brasileiro de Governança (IBCG). Foi Diretor de Produção e Comercialização da Eletronorte no período de fevereiro de 2005 a abril de 2016. No período de 2006 a 2010, atuou como Conselheiro Administrativo do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). No período de 2010 a 2012, atuou com Conselheiro Fiscal do ONS. No período de 2015 a 2016, atuou como presidente do Conselho Administrativo da Empresa Transmissora de Energia (ETE). No período de maio de 2016 até setembro de 2020, foi Diretor Presidente da Amazonas Geração e Transmissão de Energia Elétrica. Em janeiro de 2021 assumiu a Diretoria de Operação e Manutenção da Norte Energia, cargo que ocupa até o presente momento.



wadycharone@norteenergiasa.com.br
(93) 99651-1832

3. ANGELO LUIZ DE FRANCESCHI

Engenheiro Eletricista graduado pela Pontifícia Universidade Católica do RS – PUCRS, com Pós-graduação em Controle Avançado de Sistema Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC, pós-graduado em Gestão de Sistemas Elétricos pela Pontifícia Universidade Católica do RJ – PUCRJ e pós-graduado em Gestão Empresarial MBA pela FGV. Desenvolveu atividades na CEEE-GT no Centro de Operação de Sistema até 99, de 1999 a 2005 atuou na RGE estruturando a área de operação com foco no tempo real, estudos elétricos, proteção e pós operação. De 2006 até 2019 atuou no ONS, como Gerente Executivo do Núcleo Regional Sul, Gerente Executivo do Centro Nacional de Operação do Sistema (CNOS) e como assessor executivo da diretoria de Operação. Atualmente está exercendo a função de Gerente do Planejamento da Operação na Norte Energia S.A., onde é responsável pelos Estudos Elétricos, Estudos Hidrológicos e pelo Planejamento Eletroenergético do Complexo Belo Monte.



angelofranceschi@norteenergiasa.com.br
(93) 98807-2910

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4 – MODOS DE FALHA E ANÁLISE DE RISCOS DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

ANÁLISE DAS CONSEQUÊNCIAS DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE UMA BARRAGEM DE MINERAÇÃO UTILIZANDO A FERRAMENTA DE RISCOS BOW TIE

Jairo Viveiros de Souza
Supervisor Geotécnico – Mineração Taboca

Fernanda Pereira Gouveia
Doutora em Estruturas e Construção Civil – UFPA

Juliano Pereira de Paula
Engenheiro Eletricista Master – Mineração Taboca

RESUMO

O estudo aplica a metodologia Bow Tie na análise de riscos associados ao cenário hipotético de ruptura por galgamento de uma barragem de rejeitos em operação no estado do Amazonas, com foco na redução da exposição humana em vias inseridas na mancha de inundação. A metodologia contemplou a caracterização da barragem, elaboração do diagrama Bow Tie e avaliação de medidas mitigadoras. Foram analisados documentos técnicos, incluindo estudos de Dam Break, Plano de Segurança da Barragem (PSB), estudos hidrológicos, geotécnicos e dados de monitoramento. O cenário adotado considera precipitação extrema associada à falha do sistema extravasor. O diagrama permitiu representar ameaças, controles preventivos, consequências e barreiras mitigatórias associadas ao galgamento. Os resultados demonstraram que a mancha de inundação intercepta estradas operacionais utilizadas por veículos e colaboradores do empreendimento. Foram avaliadas três alternativas mitigadoras: cancelas automatizadas, sistema RFID/Tag veicular e reforço da sinalização de segurança. A solução baseada em placas robustas associadas a giroflex alimentado por energia solar apresentou melhor desempenho operacional devido à simplicidade de implantação, facilidade de manutenção e melhor relação custo-benefício. A metodologia Bow Tie demonstrou potencial como ferramenta complementar de apoio à gestão de riscos e integração ao PAEBM.

ABSTRACT

This study applies the Bow Tie methodology to risk analysis associated with a hypothetical overtopping failure scenario of an operating tailings dam located in the state of Amazonas, Brazil, focusing on reducing human exposure on operational roads located within the flood inundation area. The methodology included dam characterization, development of the Bow Tie diagram, and

evaluation of mitigation measures. Technical documents such as Dam Break studies, Dam Safety Plan (PSB), hydrological and geotechnical studies, as well as monitoring and instrumentation data, were analyzed. The adopted scenario considered extreme rainfall associated with spillway system failure. The Bow Tie diagram enabled the representation of threats, preventive controls, consequences, and mitigation barriers related to overtopping failure. Results showed that the flood inundation area intercepts operational roads used by vehicles and workers. Three mitigation alternatives were evaluated: automated gates, RFID/tag vehicle monitoring systems, and reinforced safety signaling. The solution based on robust warning signs associated with solar-powered beacon lights presented the best operational performance due to implementation simplicity, ease of maintenance, and better cost-benefit ratio. The Bow Tie methodology demonstrated strong potential as a complementary tool for risk management and integration with the Emergency Action Plan for Mining Dams (PAEBM).

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de abordagens de gestão de riscos na mineração e para segurança de barragens foi impulsionado por grandes desastres envolvendo estruturas de disposição de rejeitos que ganharam notoriedade nacional e internacional. Esses eventos contribuíram para a ampliação da discussão sobre gerenciamento de riscos no setor mineral, bem como para a criação de padrões, diretrizes e requisitos formais voltados à implementação de procedimentos de gestão de riscos como parte dos processos de governança corporativa e segurança de barragens. Nesse contexto, destaca-se o estudo desenvolvido por [1], da Clark University, que apontou que as consequências associadas às falhas em estruturas de armazenamento de rejeitos ocupam posição relevante entre os principais tipos de acidentes avaliados em escala mundial, apresentando impactos comparáveis ou superiores aos observados em acidentes aeronáuticos e incêndios de grande porte.

No Brasil, o fortalecimento da legislação relacionada à segurança de barragens resultou na ampliação das exigências regulatórias aplicáveis ao setor, culminando na publicação [2], que estabelece critérios relacionados à gestão da segurança, monitoramento, classificação, inspeções, planos de ação emergencial e avaliação contínua das condições de estabilidade das barragens de mineração.

Nesse contexto, metodologias de análise de riscos passaram a ser incorporadas aos processos de tomada de decisão em empreendimentos minerários. A [3], norma voltada às técnicas de avaliação de riscos, apresenta diferentes ferramentas aplicáveis à identificação, análise e tratamento de riscos em sistemas complexos, destacando-se a metodologia Bow Tie devido à sua capacidade de representar graficamente ameaças, evento crítico, consequências e barreiras de controle.

De acordo com o [4], o método Bow Tie demonstra como ameaças e perigos podem conduzir à perda de controle de um risco, originando diferentes consequências indesejadas. Conforme estabelecido pela [3], a metodologia permite representar de forma integrada os mecanismos causais de um evento crítico, os controles preventivos voltados à redução da probabilidade de ocorrência e as barreiras mitigatórias destinadas à redução das consequências associadas ao evento. A Figura 1 apresenta o modelo esquemático do diagrama Bow Tie.

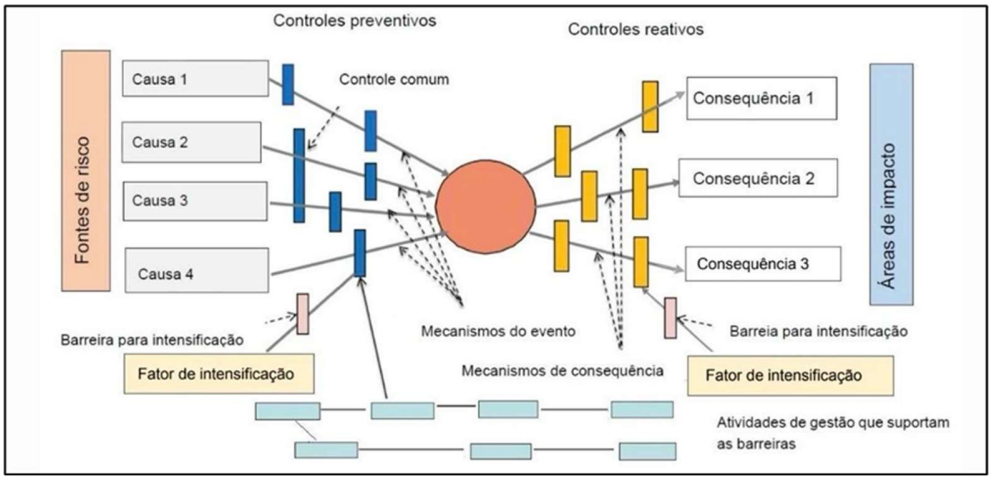


Figura 1 – Diagrama Bow Tie. Fonte: Adaptado da ABNT NBR IEC 31010 (2021).

Segundo [5], o método Bow Tie ganhou ampla aplicação em setores industriais de alto risco, como petróleo e gás, aviação, processos químicos e mineração, principalmente devido à sua facilidade de comunicação visual e capacidade de integrar diferentes elementos da gestão de riscos em um único diagrama. Estudos desenvolvidos por [6], [7], [8], [9], [10], reforçam a relevância da metodologia em análises relacionadas à segurança operacional e confiabilidade de sistemas críticos.

Em barragens de rejeitos, os estudos de ruptura hipotética (Dam Break) representam importante ferramenta para avaliação das áreas potencialmente afetadas em cenários de falha, permitindo identificar manchas de inundação, profundidades, velocidades de escoamento e tempos de chegada da onda de ruptura. Essas informações subsidiam diretamente a elaboração de estratégias de mitigação, definição de zonas de risco e implementação de medidas previstas no Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM).

Dentre os modos de falha aplicáveis às barragens de mineração, o galgamento destaca-se como um dos mecanismos mais recorrentes em estudos relacionados à segurança de barragens, especialmente devido à sua elevada capacidade de desencadear processos erosivos progressivos e ruptura da estrutura.

Nesse contexto, a aplicação da metodologia Bow Tie associada aos resultados de estudos de ruptura hipotética apresenta potencial relevante para análise integrada dos riscos operacionais e humanos associados às barragens de rejeitos, permitindo avaliar a efetividade das barreiras existentes e identificar oportunidades de melhoria nos controles preventivos e mitigatórios.

O presente estudo tem como objetivo aplicar a metodologia Bow Tie na análise das consequências operacionais e humanas decorrentes de um cenário hipotético de ruptura por galgamento de uma barragem de rejeitos em operação no estado do Amazonas. O foco principal do trabalho consiste na avaliação de soluções

mitigadoras voltadas à redução da exposição humana em estradas e vias internas da mineradora localizadas dentro da mancha de inundação da barragem, considerando aspectos relacionados à robustez operacional, integração com o PAEBM, dependência de fatores humanos, confiabilidade das barreiras, viabilidade de implantação e relação custo-benefício.

2. METODOLOGIA

A pesquisa contempla inicialmente a caracterização da barragem analisada, seguindo para a aplicação da metodologia Bow Tie no cenário hipotético de ruptura por galgamento e, posteriormente, para a avaliação das medidas mitigadoras voltadas às áreas operacionais inseridas na mancha de inundação. As etapas do desenvolvimento metodológico estão apresentadas na Figura 2.

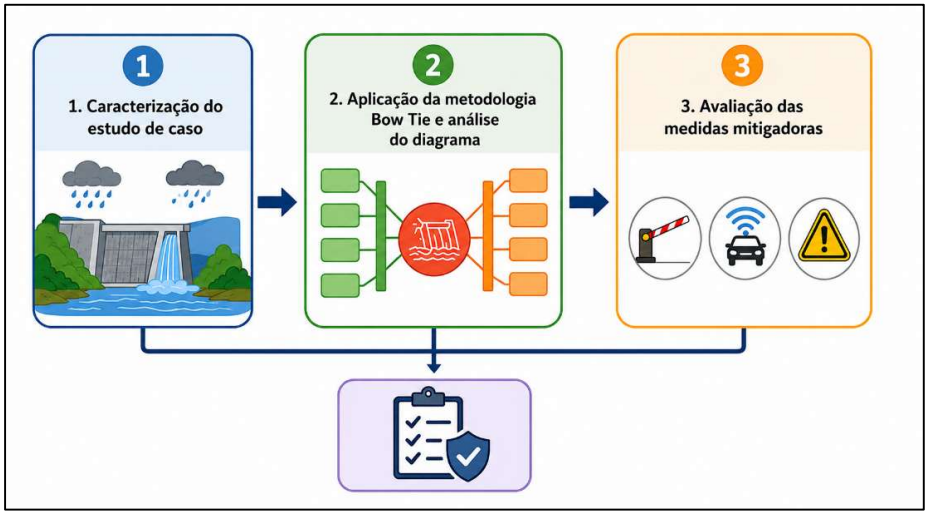


Figura 2 – Fluxograma esquemático das etapas metodológicas aplicadas no desenvolvimento da pesquisa. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2.1 Caracterização do estudo de caso e definição do modo de falha

A caracterização da barragem foi realizada por meio da análise de documentos técnicos do empreendimento, incluindo Plano de Segurança da Barragem (PSB), estudos de ruptura hipotética (Dam Break), estudos hidrológicos e geotécnicos, relatórios de monitoramento e instrumentação, além de procedimentos operacionais relacionados à gestão da estrutura.

O estudo de caso compreende uma barragem de rejeitos em operação localizada no estado do Amazonas. A estrutura possui sistema de drenagem interna, sistema extravasor e classificação quanto ao Dano Potencial Associado (DPA) Alto e Categoria de Risco (CRI) Baixa. O sistema de monitoramento geotécnico é

composto por piezômetros, indicadores de nível d'água, marcos superficiais, réguas linimétricas, limnígrafo, medidor de vazão e pluviógrafo.

O modo de falha adotado no estudo corresponde ao galgamento da barragem, considerando cenário associado à precipitação extrema e falha do sistema extravasor.

2.2 Aplicação da metodologia Bow Tie e análise do diagrama

A metodologia Bow Tie foi aplicada com base na abordagem estabelecida pela [3]. O diagrama foi desenvolvido com auxílio do software Microsoft Visio, permitindo a organização das ameaças, controles preventivos, consequências e medidas mitigatórias associadas ao cenário hipotético analisado.

A construção do diagrama considerou informações provenientes dos estudos de Dam Break, documentos operacionais da barragem e análise das áreas potencialmente atingidas pela mancha de inundação.

No lado esquerdo do diagrama foram avaliadas as ameaças capazes de conduzir ao evento topo (galgamento), enquanto no lado direito foram analisadas as consequências potenciais decorrentes da ruptura hipotética da estrutura.

A aplicação da metodologia também tomou como referência estudos científicos relacionados ao uso do método Bow Tie em análises de risco na mineração e em sistemas industriais de alto risco, destacando-se trabalhos desenvolvidos por [6], [7], [8], [9], [10].

2.3 Avaliação das medidas mitigadoras

A etapa final da metodologia contemplou a avaliação preliminar de alternativas mitigadoras aplicáveis às estradas e vias internas da mineradora inseridas na mancha de inundação da barragem.

As soluções avaliadas foram baseadas em propostas previamente desenvolvidas pelo empreendimento, contemplando medidas de controle de acesso, monitoramento operacional e reforço da percepção de risco nas vias potencialmente afetadas.

Foram analisadas três alternativas principais:

- Implantação de cancelas automatizadas para controle de acesso;
- Sistema de monitoramento operacional utilizando RFID/Tag veicular;
- Reforço da sinalização de segurança nas áreas inseridas na mancha de inundação.

A análise comparativa considerou critérios técnicos relacionados à efetividade na redução da exposição humana, confiabilidade operacional, facilidade de implantação, necessidade de manutenção, integração com o PAEBM e custo-benefício. A comparação foi realizada de forma qualitativa, buscando identificar a alternativa mais aderente às condições operacionais do empreendimento. Os

resultados da avaliação das alternativas mitigadoras e a justificativa para seleção da solução adotada são apresentados e discutidos no Capítulo 3.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização da barragem do estudo de caso e definição do modo de falha

A barragem analisada neste estudo corresponde a uma estrutura de disposição de rejeitos em operação localizada no estado do Amazonas, implantada para armazenamento de rejeitos provenientes das atividades de beneficiamento mineral. A estrutura apresenta altura máxima aproximada de 13,78 m, comprimento de crista aproximado de 225 m e volume total estimado em 6,87 milhões de m³.

A barragem possui sistema de drenagem interna, sistema extravasor e instrumentação geotécnica composta por piezômetros, indicadores de nível d'água, marcos superficiais, réguas linimétricas, limnígrafo, medidor de vazão e pluviógrafo, utilizados para acompanhamento contínuo das condições operacionais e geotécnicas da estrutura.

Quanto à classificação de segurança, o barramento está enquadrado como Dano Potencial Associado (DPA) Alto e Categoria de Risco (CRI) Baixa, conforme [11]. Sendo o módulo de falha crível, verificado nos estudos de ruptura hipotética Dam Break, falha por galgamento na Mineração Taboca.

O modo de falha por galgamento ocorre quando o nível do reservatório ultrapassa a cota da crista da barragem, resultando no escoamento de água sobre a estrutura. Segundo [12], esse processo pode desencadear erosões progressivas na face de jusante do barramento, favorecendo a evolução da brecha de ruptura e o aumento da vazão liberada.

De acordo com [13] e [14], situações associadas à insuficiência hidráulica, eventos hidrológicos extremos e limitações operacionais dos sistemas extravasores figuram entre os principais fatores relacionados a cenários de galgamento em barragens.

O cenário adotado neste estudo considera precipitação extrema associada ao tempo de retorno de 10.000 anos combinada à falha do sistema extravasor da barragem, resultando em condições favoráveis à ocorrência do galgamento (Figura 3).

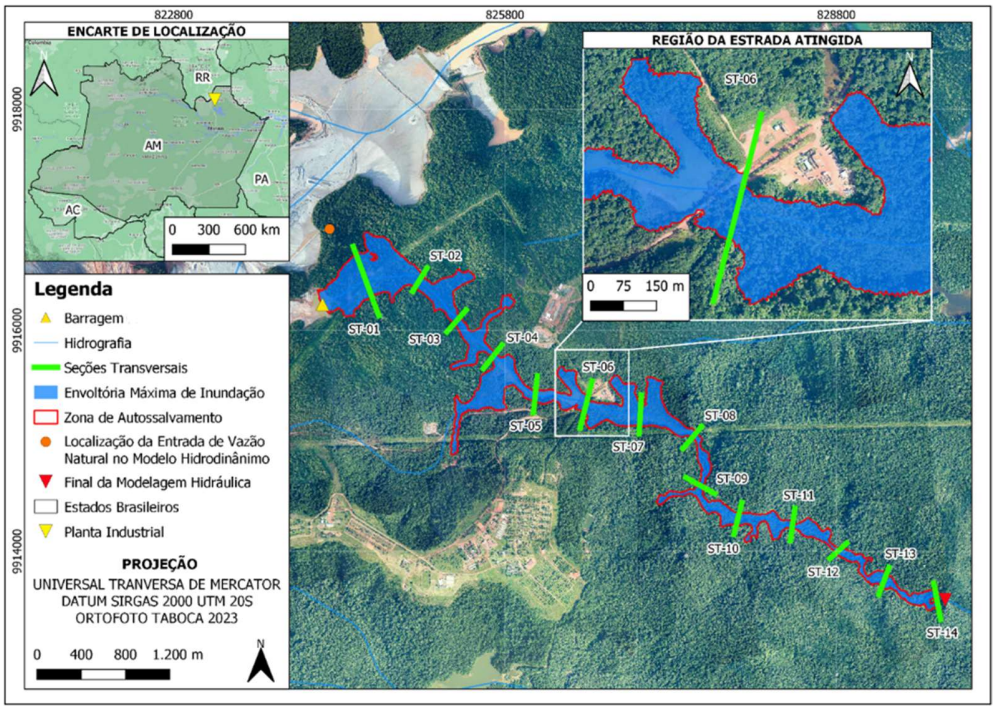


Figura 3 – Mapa com a localização da barragem e a mancha de inundação da barragem em estudo. Fonte: PAEBM da Barragem (2026).

Conforme destacado por [15], [16] e [17], falhas relacionadas à gestão hidráulica e aos mecanismos de galgamento figuram entre os principais modos de ruptura identificados em estudos envolvendo barragens de rejeitos em operação.

A partir dos resultados obtidos nos estudos de Dam Break, verificou-se que a mancha de inundação decorrente do cenário hipotético de ruptura intercepta estradas e vias internas utilizadas na rotina do empreendimento, incluindo acessos operacionais e rotas de circulação interna, tornando necessária a avaliação de medidas voltadas à redução da exposição humana nessas áreas.

Nesse contexto, a metodologia Bow Tie foi aplicada como ferramenta de apoio à análise integrada das ameaças, consequências e barreiras de controle associadas ao cenário hipotético de galgamento da barragem.

3.2 Diagrama de Bow Tie

O diagrama Bow Tie foi desenvolvido em uma única estrutura gráfica, sendo posteriormente dividido em duas figuras com o objetivo de facilitar a visualização e interpretação dos elementos que compõem o cenário hipotético de ruptura por galgamento da barragem.

Na Figura 4 é apresentado o lado esquerdo do diagrama, contemplando as ameaças identificadas, os controles preventivos, os fatores de intensificação ou degradação e as respectivas barreiras associadas a esses fatores.

Na Figura 5 é apresentado o lado direito do Bow Tie, no qual são descritas as consequências relacionadas à ocorrência do evento de galgamento, bem como os controles mitigatórios, fatores de degradação e barreiras vinculadas às medidas de mitigação adotadas.

A elaboração do diagrama demandou análise integrada realizada por equipe multidisciplinar envolvendo profissionais das áreas de gestão técnica, operação, manutenção e segurança de barragens, além do apoio de profissional com atuação em gerenciamento de riscos, responsável pela condução da metodologia e apoio às discussões técnicas.

Também foram utilizados como suporte os documentos técnicos da barragem, estudos de ruptura hipotética (Dam Break), informações do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM) e referências bibliográficas relacionadas à análise de risco aplicada à gestão de barragens de rejeitos.

3.3 Modo de falha: Galgamento

Para o presente estudo foi considerado que o modo de falha por galgamento, conforme Figura 4, pode estar associado à ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como chuvas intensas acima da capacidade de projeto da estrutura, insuficiência da capacidade de trânsito de cheias, obstrução do sistema extravasor e falhas operacionais relacionadas à gestão hidráulica do reservatório.

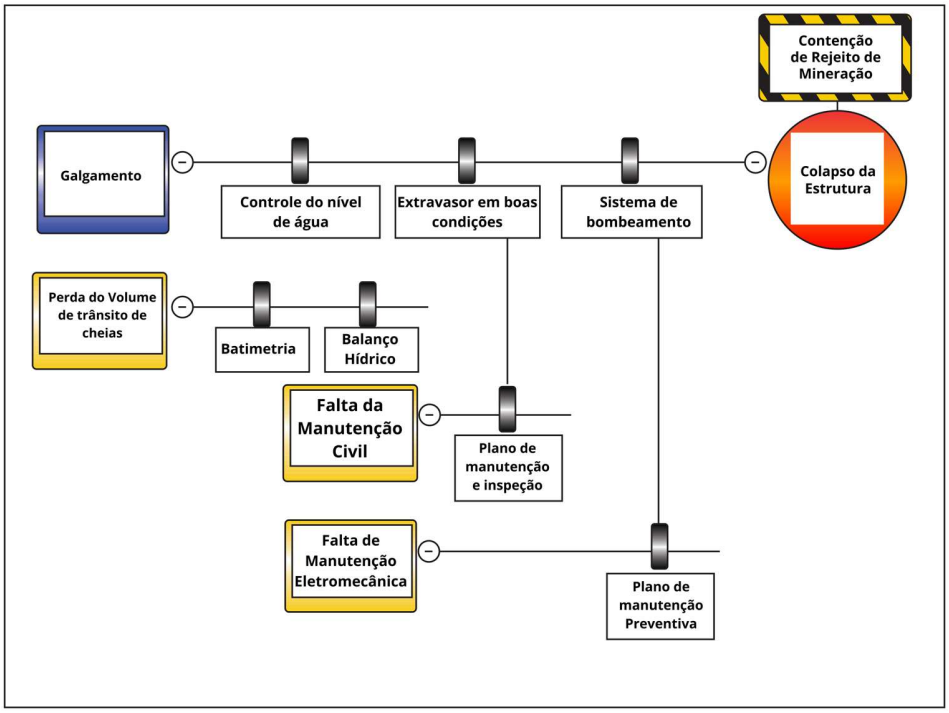


Figura 4 – Lado esquerdo do diagrama Bow Tie, apresentando o modo de falha por galgamento, ameaças, controles preventivos e fatores de intensificação associados ao cenário hipotético de ruptura da barragem. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Segundo [18], projetos de barragens devem contemplar estruturas hidráulicas, como vertedouros e dispositivos de drenagem superficial, capazes de conduzir o excesso de água de forma segura e controlada, evitando que o reservatório ultrapasse condições operacionais críticas.

O monitoramento contínuo do nível do reservatório foi considerado a principal barreira preventiva associada ao cenário de galgamento, uma vez que a manutenção adequada da borda livre contribui diretamente para o controle do volume armazenado no reservatório.

Conforme definido pela [19], a borda livre corresponde à diferença de cota entre o nível máximo do reservatório durante a passagem da cheia de projeto e a crista do barramento.

O acompanhamento operacional da barragem ocorre por meio de instrumentos de monitoramento hidrológico instalados na estrutura, incluindo réguas milimétricas e demais dispositivos utilizados no controle operacional do reservatório. Além disso, avaliações periódicas e acompanhamento do balanço hídrico auxiliam na manutenção das condições adequadas de operação da barragem.

A ausência de monitoramento adequado e falhas relacionadas à gestão do balanço hídrico foram consideradas fatores capazes de intensificar a perda do controle operacional do volume armazenado.

Além do monitoramento do reservatório, outro importante controle preventivo considerado no diagrama corresponde ao sistema extravasor da barragem, sendo a manutenção periódica dessa estrutura fundamental para evitar obstruções e garantir o adequado funcionamento hidráulico durante eventos críticos de cheia.

Também foram considerados controles operacionais associados aos sistemas auxiliares de drenagem do reservatório, utilizados quando necessário para apoio ao controle hidráulico da barragem. Dessa forma, a manutenção eletromecânica e a garantia da disponibilidade operacional desses sistemas foram incorporadas como medidas preventivas relevantes no cenário analisado.

A deficiência de manutenção dos sistemas hidráulicos e operacionais foi considerada fator de intensificação capaz de comprometer a efetividade das barreiras preventivas associadas ao modo de falha por galgamento.

3.4 Consequências e Barreiras de Mitigação

Na análise das consequências associadas ao cenário hipotético de ruptura da barragem por galgamento, foi realizado um recorte analítico voltado ao atingimento de estradas operacionais localizadas dentro da área interna do empreendimento e inseridas na mancha de inundação obtida nos estudos de ruptura hipotética (Dam Break). A Figura 5 apresenta o lado direito do diagrama Bow Tie, contemplando as consequências potenciais associadas ao evento topo,

bem como os controles reativos e medidas mitigadoras adotadas para redução dos impactos decorrentes do cenário analisado.

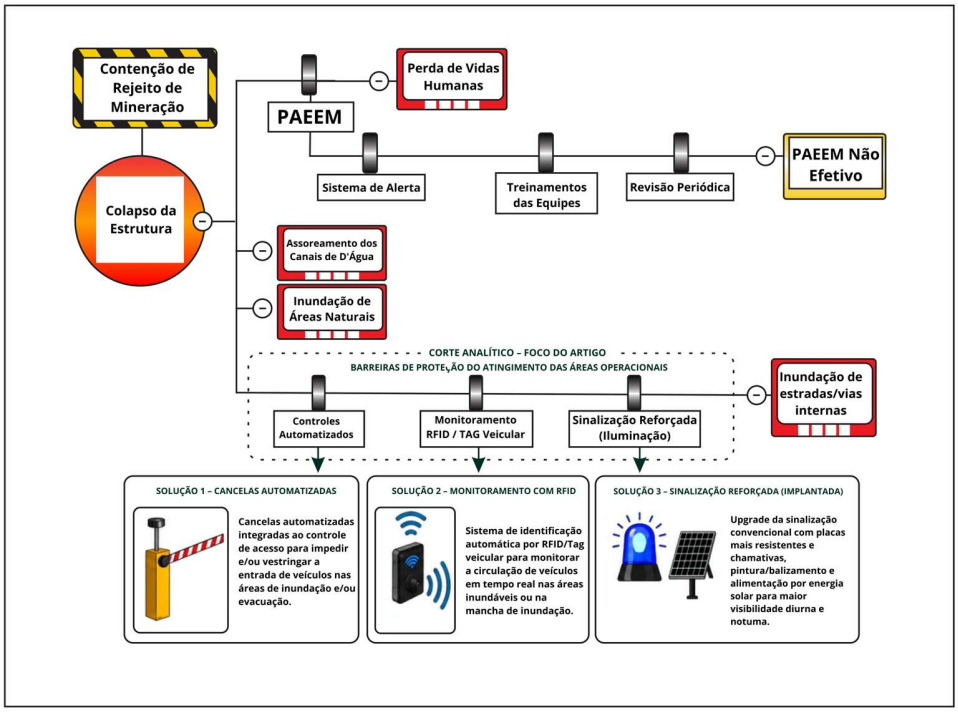


Figura 5 – Lado direito do diagrama Bow Tie, apresentando as consequências potenciais associadas ao cenário hipotético de ruptura por galgamento, os controles reativos e as medidas mitigadoras aplicáveis às estradas e vias internas da mineradora inseridas na mancha de inundação. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As estradas e vias internas da mineradora potencialmente atingidas, destaca-se a possibilidade de circulação, mesmo que temporária, de colaboradores, veículos leves, equipamentos móveis e caminhões utilizados nas atividades rotineiras da mineração. As vias internas inseridas na mancha de inundação avaliadas correspondem a acessos internos estratégicos utilizados para deslocamento entre áreas operacionais do empreendimento, sendo parcialmente interceptadas ou tangenciadas pela mancha de inundação.

Considerando as condições operacionais existentes nas áreas analisadas, foram avaliadas três alternativas de barreiras mitigatórias voltadas à redução da exposição humana e ao aumento da percepção de risco nas áreas potencialmente afetadas.

A primeira alternativa analisada correspondeu à implantação de cancelas automatizadas para controle de acesso nas vias operacionais inseridas na mancha de inundação. A proposta considerava a utilização de sistema automatizado integrado ao controle de acesso do empreendimento, permitindo monitoramento em tempo real da circulação de veículos nas áreas avaliadas.

Como principal vantagem, a solução possibilitaria maior controle operacional dos acessos. Entretanto, verificou-se que eventuais falhas operacionais ou necessidades de manutenção corretiva poderiam ocasionar interrupções no fluxo das vias operacionais, impactando diretamente a dinâmica operacional do empreendimento.

A segunda alternativa consistiu na implantação de sistema de monitoramento operacional utilizando tecnologia RFID (Radio Frequency Identification) associada a Tag veicular, permitindo identificação automática dos veículos por radiofrequência nos acessos inseridos na mancha de inundação. A proposta previa a instalação de etiquetas eletrônicas na frota operacional e receptores RFID nos pontos monitorados, possibilitando registro automático da circulação de veículos em tempo real. Como principal vantagem, o sistema permitiria monitoramento contínuo sem necessidade de interrupção do fluxo operacional. Contudo, observou-se como limitação o fato de o sistema realizar apenas o monitoramento dos veículos, não garantindo controle individualizado das pessoas presentes nas áreas operacionais avaliadas.

A terceira alternativa analisada correspondeu ao reforço da sinalização de segurança nas áreas inseridas na mancha de inundação, contemplando um upgrade das sinalizações convencionais normalmente utilizadas em áreas de mineração. A proposta considerou a implantação de placas mais robustas e visualmente mais chamativas, associadas a faixas de sinalização e dispositivos visuais de alerta voltados ao aumento da percepção de risco dos usuários das vias operacionais.

Além das placas indicativas de área de inundação, também foi prevista a instalação de sistema luminoso tipo giroflex alimentado por energia solar nos acessos às áreas avaliadas, permitindo maior destaque visual tanto no período diurno quanto noturno. A solução buscou aumentar o nível de atenção dos condutores e usuários das vias operacionais durante a circulação nas áreas potencialmente afetadas pela mancha de inundação.

Dentre as alternativas estudadas, a solução baseada no reforço da sinalização de segurança apresentou melhor aderência às características operacionais do empreendimento. Em uma avaliação semiquantitativa de efetividade, essa alternativa foi considerada de alta efetividade na redução da exposição humana, por proporcionar alerta visual contínuo aos usuários das vias, elevada disponibilidade operacional e reduzida probabilidade de indisponibilidade quando comparada às alternativas baseadas em sistemas eletromecânicos.

Considerando as condições operacionais avaliadas, a sinalização reforçada foi incorporada como importante barreira mitigatória associada ao cenário de atingimento das estradas operacionais inseridas na mancha de inundação.

A sinalização reforçada constitui uma barreira administrativa de caráter visual, cuja função é aumentar a percepção permanente do risco pelos usuários das vias

operacionais. Sua efetividade depende da integração com treinamentos, procedimentos operacionais e ações previstas no PAEBM, não devendo ser considerada como substituta de barreiras físicas ou de sistemas de alerta, mas sim como medida complementar de gestão de riscos.

3.5 Implantação da barreira mitigatória nas áreas operacionais

A implementação da barreira mitigatória selecionada foi realizada nas vias operacionais interceptadas pela Zona de Autossalvamento (ZAS) da barragem estudada, considerando os resultados obtidos nos estudos de ruptura hipotética (Dam Break).

Conforme Figura 6, a mancha de inundação da barragem intercepta duas estradas operacionais internas utilizadas para circulação de colaboradores, veículos leves e equipamentos operacionais do empreendimento. Em função dessa condição, foi implantado sistema de sinalização reforçada com o objetivo de aumentar a percepção de risco dos usuários que trafegam nessas áreas.

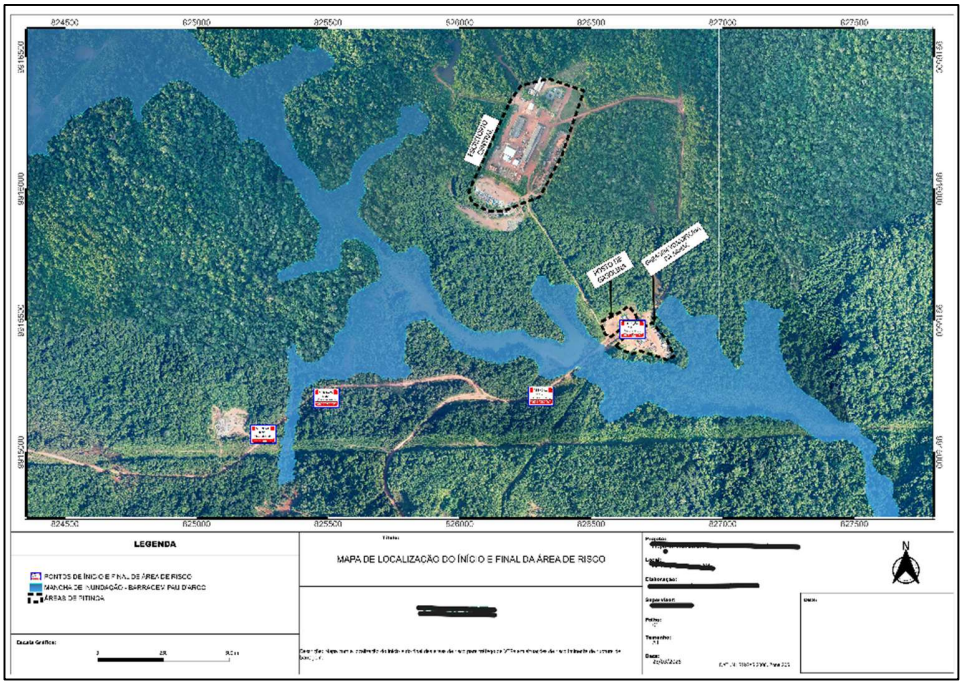


Figura 6 – Mapa da mancha de inundação da barragem em estudo, com a localização dos quatro postes contendo placas de sinalização de segurança instaladas nas áreas operacionais potencialmente afetadas. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A solução implantada contemplou a instalação de quatro postes de sinalização distribuídos ao longo das duas vias operacionais, sendo instalados dois pontos de sinalização em cada estrada, correspondentes aos limites de entrada e saída da área inserida na mancha de inundação, conforme apresentado na Figura 7. Cada estrutura foi composta por poste de fibra, sistema luminoso tipo giroflex azul

alimentado por painel solar e conjunto de placas indicativas de área de risco associada à barragem.

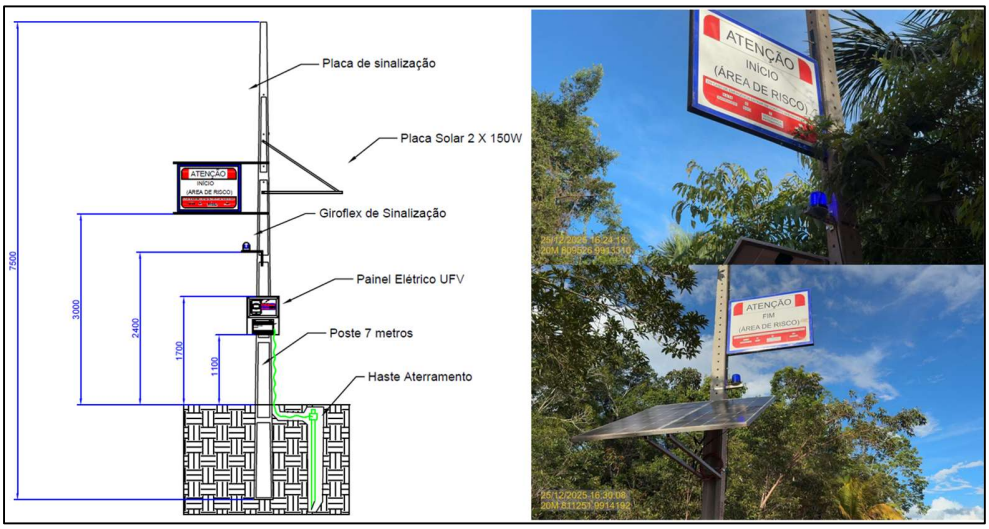


Figura 7 – Sistema de sinalização de área de risco implantado nas vias inseridas na Zona de Autossalvamento (ZAS), com indicação do início e término da área potencialmente atingida pela mancha de inundação. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O giroflex permanece em funcionamento contínuo durante 24 horas por dia, buscando ampliar a percepção visual dos condutores tanto no período diurno quanto noturno, principalmente em condições de baixa luminosidade ou durante eventos climáticos adversos.

Além disso, cada poste recebeu duas placas de sinalização instaladas em sentidos opostos. Dessa forma, os usuários que ingressam na área visualizam a indicação de início da mancha de inundação, enquanto os condutores que trafegam no sentido contrário visualizam a informação de saída da área de risco. A Figura 8 apresenta o layout das placas de sinalização implantadas para indicação de início e término da área de risco nas vias inseridas na ZAS.



Figura 8 – Layout das placas de sinalização utilizadas para indicação de início e término da área de risco nas vias operacionais inseridas na Zona de Autossalvamento (ZAS). Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As placas foram instaladas em altura superior a 4 metros em relação ao solo, visando aumentar a visibilidade da sinalização para veículos leves, caminhões e equipamentos de grande porte utilizados nas operações de mineração.

A estratégia adotada buscou aumentar a percepção de risco nas estradas e vias internas potencialmente afetadas pela mancha de inundação, reduzindo a dependência exclusiva de controles administrativos e favorecendo a identificação visual contínua das áreas inseridas na Zona de Autossalvamento da barragem.

Além da implantação física das estruturas de sinalização, a medida foi incorporada ao Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM) da estrutura, passando a integrar os procedimentos de gestão de emergência e segurança operacional adotados pelo empreendimento.

Adicionalmente, a sinalização implantada passou a ser reforçada nos treinamentos expositivos realizados pela mineradora, bem como nos programas de integração de pessoal e orientações relacionadas à circulação nas áreas operacionais inseridas na mancha de inundação, visando ampliar a conscientização dos colaboradores quanto aos riscos associados às áreas inseridas na Zona de Autossalvamento da barragem. Além da capacitação dos usuários, a manutenção periódica das placas, postes, giroflex e sistema de alimentação solar é fundamental para preservar a efetividade da barreira ao longo do tempo.

3.6 Análise da aplicação do método Bow Tie

A aplicação da metodologia Bow Tie, possibilitou representar graficamente os mecanismos associados ao cenário hipotético de ruptura da barragem estudada. A construção do diagrama exigiu análise técnica detalhada para definição das ameaças, controles preventivos, fatores de intensificação, consequências e barreiras mitigatórias associadas ao evento topo.

A elaboração da análise depende fortemente da disponibilização de documentos técnicos da barragem, estudos de Dam Break, Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM), procedimentos operacionais e referências bibliográficas relacionadas à gestão de riscos em mineração. Observou-se também a importância da participação de profissional com experiência em gerenciamento de riscos para condução técnica das discussões e avaliação dos cenários analisados.

O uso do software Microsoft Visio apresentou boa aplicabilidade para construção do diagrama, permitindo organização visual simplificada e facilidade de edição das informações. A metodologia possibilitou representar de forma integrada as ameaças, controles preventivos, consequências e medidas mitigatórias associadas ao cenário de galgamento, contribuindo para identificação de oportunidades de melhoria voltadas à redução da exposição humana nas áreas inseridas na mancha de inundação.

Como limitação, destaca-se que a representação gráfica simplificada pode não contemplar integralmente todas as interações e variáveis relacionadas ao comportamento complexo de barragens de rejeitos. Dessa forma, o método Bow Tie deve ser utilizado como ferramenta complementar de apoio à gestão de riscos, associado a outras metodologias e estudos técnicos aplicados à segurança de barragens.

4. CONCLUSÃO

A aplicação da metodologia Bow Tie permitiu realizar análise integrada do cenário hipotético de ruptura da barragem por galgamento, possibilitando identificar ameaças, controles preventivos, consequências potenciais e barreiras mitigatórias relacionadas às estradas e vias internas da mineradora inseridas na mancha de inundação.

Os resultados demonstraram que a metodologia apresenta boa capacidade de representação das relações de causa e efeito associadas a cenários complexos de risco em barragens de mineração, favorecendo a visualização dos mecanismos envolvidos antes e após a ocorrência do evento analisado.

A comparação das alternativas mitigatórias indicou que a solução baseada no reforço da sinalização de segurança apresentou o melhor desempenho entre as alternativas avaliadas, considerando critérios de confiabilidade operacional, facilidade de implantação, necessidade de manutenção, integração aos procedimentos do PAEBM e potencial para redução da exposição humana nas vias operacionais inseridas na mancha de inundação. A implantação da sinalização reforçada contribuiu para aumentar a percepção de risco por meio de placas de maior destaque visual, estruturas mais robustas e giroflex alimentado por energia solar em funcionamento contínuo.

Por se tratar de uma barreira administrativa de caráter visual, sua efetividade depende da adequada manutenção dos dispositivos, da realização de treinamentos periódicos e da integração com os procedimentos operacionais e de emergência do empreendimento, reforçando seu papel complementar às demais barreiras previstas na gestão da segurança de barragens.

Observou-se ainda potencial de aprimoramento da solução implantada, com possibilidade futura de instalação de sistema de iluminação direcionado às placas, visando ampliar a visibilidade noturna das estruturas.

Sob o ponto de vista da gestão de riscos, a metodologia Bow Tie demonstrou potencial para integração aos processos de segurança de barragens e aos instrumentos previstos no Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM), podendo atuar como ferramenta complementar de apoio à tomada de decisão e ao fortalecimento das práticas preventivas relacionadas à segurança de barragens de rejeitos.

5. PALAVRAS-CHAVE

Barragem de rejeitos; Bow Tie; Gestão de riscos; Dam Break; PAEBM; Galgamento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CONGCONG, Chen; MA, Bo; ZHONGXUE, Li (2022) – "Mining Tailings Storage Facility Failure Analysis Model using Bow Tie Representation", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, v. 22, p. 999–1002.

[2] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM (2022) – "Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022", regulamento de segurança de barragens de mineração, Diário Oficial da União, Brasília, Brasil.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2012) – "ABNT IEC 31010: Gestão de riscos – técnicas para o processo de avaliação de riscos", Rio de Janeiro, Brasil.

[4] CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY – CCPS (2018) – "Bow Ties in Risk Management – A Concept Book for Process Safety", New York, Estados Unidos.

[5] RUIJTER, A.; GULDENMUND, F. (2016) – "The bow tie method: a review", *Safety Science*, v. 88, p. 211–218.

[6] BADREDDINE, Taieb Ben Romdhane; HAJKACEM, Mohamed Aymen Ben; AMOR, Nahla Ben (2014) – "A new multi-objectives approach to implement preventive and protective barriers in Bow tie diagram", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 26, n. 4, p. 258–253.

[7] CHEVREAU, F. R.; WYBO, J. L.; CAUCHOIS, D. (2006) – "Organizing learning processes on risks by using the bow-tie representation", *Journal of Hazardous Materials*, v. 130, n. 3, p. 276–283.

[8] KHAKZAD, Nima; KHAN, Faisal; AMYOTTE, Paul (2012) – "Dynamic risk analysis using bow-tie approach", *Reliability Engineering & System Safety*, v. 104, p. 36–44.

[9] COCKSHOTT, J. E. (2005) – "Probability Bow-Ties – A Transparent Risk Management Tool", *Process Safety and Environmental Protection*, v. 83, n. 4, p. 307–316.

[10] OTTONE, G. (2014) – “Fault tree analysis of slurry and dewatered tailings management – a framework”, tese de doutorado, University of British Columbia, Canadá.

[11] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM (2023) – “Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM)”, sistema eletrônico de gerenciamento de barragens de mineração, Brasil.

[12] BALBI, D. A. (2008) – “Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens”, dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

[13] FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY – FEMA (2015) – “Reducing or Stopping Dike Failure from Overtopping and Internal Erosion”, FEMA, Estados Unidos.

[14] TALUKDAR, P.; DEY, A. (2019) – “Hydraulic failures of earth dams and embankments”, *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 4, n. 1, p. 42.

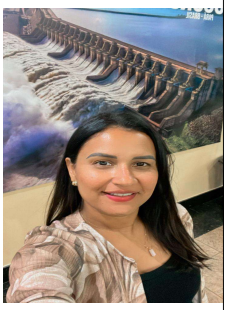
[15] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD (2001) – “Tailings Dams – Risk of Dangerous Occurrences: Lessons Learned from Practical Experiences”, Bulletin 121, Paris, França.

[16] CHEN, C. C.; ZHAO, Y. Q.; JIANG, L. J. (2019) – “Review on the current research of dam break of tailings pond”, *Mining Research and Development*, v. 39, n. 06, p. 103–108.

[17] FERNANDES, Rafaela Balbi (2020) – “Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvores de eventos e análise FMEA”, tese de doutorado em engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

[18] ALVES, D.; OLIVEIRA, C. F.; MARSAL, S. C.; SOUZA, P. N.; FONSECA, L. R. (2023) – “Monitoring and reporting dam safety operational risks based on bow tie methodology”, *Process Safety Progress*.

[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2017) – “ABNT NBR 13028: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos”, Rio de Janeiro, Brasil.

	**Jairo VIVEIROS DE SOUZA** Geólogo formado pela UNIFESSPA (2013–2018), Pós-Graduado em Engenharia Geotécnica pela PUC Minas (2021–2022) e mestrando em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental pela UFPA. Atua como Supervisor Geotécnico na Mineração Taboca S.A., com experiência em segurança de barragens, Dam Break, PAEBM, gestão de riscos, simulados de emergência, sinalizações e sistemas de sirenes automatizadas.
	**Fernanda PEREIRA GOUVEIA** Doutora em Estruturas e Construção Civil pela Universidade Federal do Pará (UFPA), com atuação em geotecnia, segurança de barragens, estruturas geotécnicas e gestão de riscos aplicados à engenharia civil. Desenvolve pesquisas relacionadas ao comportamento de estruturas geotécnicas, análises de estabilidade e metodologias aplicadas à segurança de barragens.
	**Juliano PEREIRA DE PAULA** Engenheiro Eletricista com ênfase em sistemas de energia e automação, especialista em sistemas de proteção e controle, com experiência em gestão de projetos, manutenção e implantação de soluções tecnológicas aplicadas à segurança operacional e sistemas de alerta em barragens de mineração.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

ANÁLISE DE MODOS DE FALHA POTENCIAIS EM BARRAGENS DE TERRA: UMA ABORDAGEM FMECA APLICADA A INTERVENÇÕES DE JUSANTE

Isabela SILVA
Msc. Eng. Civil Geotécnica - G5 Engenharia

Joaquim DUARTE
Diretor Técnico de Engenharia Civil - G5 Engenharia

RESUMO

Este artigo apresenta a aplicação da metodologia Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) à avaliação de riscos associados à implantação de uma berma drenante em jusante de uma barragem de terra existente. O estudo foi motivado pela necessidade de verificar como intervenções construtivas localizadas, especialmente escavações e sistemas temporários de rebaixamento do nível freático, podem interferir na estabilidade global da estrutura durante a fase executiva. A análise foi desenvolvida com base na ABNT NBR IEC 31010:2021 e em diretrizes internacionais voltadas à segurança de barragens. O sistema foi segmentado em quatro subsistemas críticos: rebaixamento do lençol freático, escavações, execução do aterro e instrumentação de obra. Foram identificados dez cenários potenciais de falha, concentrados nos mecanismos de instabilidade de taludes e erosão interna. A classificação semiquantitativa indicou predominância de riscos médios (toleráveis), desde que associadas medidas preventivas, monitoramento intensivo e protocolos de resposta rápida. Os resultados demonstram que intervenções corretivas em barragens existentes podem ser conduzidas com níveis aceitáveis de segurança, desde que apoiadas por gestão técnica robusta, instrumentação adequada e controle executivo rigoroso.

ABSTRACT

This article presents the application of the Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) methodology to assess the risks associated with the implementation of a drainage berm downstream of an existing earth dam. The study was prompted by the need to verify how localized construction interventions—specifically excavations and temporary groundwater drawdown systems—can affect the overall stability of the structure during the execution phase. The analysis was developed based on ABNT NBR IEC 31010:2021 and international dam safety guidelines. The system was segmented into four critical subsystems: groundwater drawdown, excavations, embankment construction, and construction instrumentation. Ten potential failure scenarios were identified, concentrated on

slope instability and internal erosion mechanisms. Semi-quantitative classification indicated a predominance of medium (tolerable) risks, provided they are associated with preventive measures, intensive monitoring, and rapid response protocols. The results demonstrate that corrective interventions in existing dams can be conducted with acceptable safety levels when supported by robust technical management, adequate instrumentation, and rigorous executive control.

1. INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas hidráulicas amplamente utilizadas para abastecimento público, regularização de vazões, irrigação e geração de energia [1]. Dentre os tipos de barramentos, tem-se as estruturas em terra que apresentam comportamento estrutural confiável quando corretamente projetado, operado e mantido, sendo sua segurança dependente do controle de percolação, da estabilidade dos taludes e da eficiência dos sistemas internos de drenagem.

Com o avanço do tempo de operação, é comum que barragens antigas demandem intervenções corretivas ou melhorias de desempenho, especialmente quando são identificadas anomalias relacionadas à drenagem, surgências, elevação piezométrica ou redução de eficiência dos filtros internos. Nessas situações, a execução de obras próximas ao maciço principal requer avaliação cuidadosa, pois alterações temporárias durante a construção podem introduzir novos mecanismos de risco.

Entre as soluções frequentemente adotadas para mitigação de problemas de percolação destaca-se a implantação de bermas drenantes em jusante. Essas estruturas têm como objetivo disciplinar fluxos subterrâneos, reduzir pressões neutras, captar surgências e atuar como solução estabilizadora, elevando a segurança do barramento. Entretanto, sua construção envolve escavações e movimentação de solo próximo ao pé da barragem que pode alterar o regime de fluxo e tensões da estrutura, devendo, assim, ser criteriosamente projetada e ter os riscos avaliados previamente à execução da obra.

Nesse contexto, o uso de metodologias sistemáticas de identificação e priorização de riscos tornam-se fundamentais para a avaliação do processo de execução da obra. A abordagem FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) permite decompor sistemas complexos em subsistemas operacionais, identificar modos de falha, avaliar consequências e hierarquizar criticidades, fornecendo base técnica para tomada de decisão.

O presente trabalho apresenta a aplicação dessa metodologia a uma barragem de terra em operação, considerando exclusivamente os riscos introduzidos pela implantação de uma berma drenante em jusante.

2. BREVE DESCRIÇÃO DA INTERVENÇÃO PROJETADA

A segurança de uma estrutura como barragem depende da manutenção contínua das condições previstas em projeto, assegurando a estabilidade estrutural, o desempenho hidráulico e o comportamento geotécnico adequados ao longo da vida útil da estrutura. Caso seja identificado determinado comportamento inesperado, intervenções devem ser previstas visando a melhoria do comportamento da estrutura, devendo ser precedidos estudos específicos sobre impactos temporários da obra, qual a melhoria que se obterá com a obra e avaliação dos riscos *versus* benefícios.

Em barragens de terra, os mecanismos mais relevantes de deterioração normalmente incluem: erosão interna (*piping*), instabilidade de taludes, recalques diferenciais, saturação excessiva do maciço, galgamento e degradação da drenagem interna.

Sendo que os principais modo de falha desse tipo de estrutura são: erosão interna, instabilidade e galgamento.

No presente estudo, o barramento que está em operação há mais de 40 anos, refere-se ao tipo de terra homogênea com presença de filtro vertical e horizontal, cuja região de jusante apresentou histórico de umidade persistente e necessidade de aumento de confiabilidade do sistema drenante. Como solução corretiva definida após anos de operação e ocorrência de umidade constante, foi concebida a implantação de uma berma drenante composta por: colchão drenante granular, poços de alívio, tubulações coletoras, medidores de vazão, sistema de bombeamento, aterro de regularização e instrumentação geotécnica complementar. A obra foi projetada para ser executada por setores sucessivos, com escavações controladas e rebaixamento temporário do nível freático nas frentes ativas visando a mitigação de riscos.

A avaliação dos riscos utilizou a metodologia FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) que deriva da tradicional FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), incorporando a análise de criticidade dos eventos identificados [2].

3. METODOLOGIA FMECA

De acordo com [2], o método pode ser aplicado durante o projeto, fabricação ou operação de um sistema físico para melhorar o projeto, selecionar entre alternativas de projeto ou planejar um programa de manutenção e pode fornecer um ponto de partida para uma análise de causa-raiz.

A aplicação da metodologia FMECA envolve: identificação e decomposição do sistema em subsistemas; identificação das funções de cada elemento; determinação dos modos de falha; identificação das causas prováveis dos modos de falha; análise dos efeitos; atribuição de índices de severidade e ocorrência com a priorização das ações de controle; identificação das medidas de controle de risco (prevenção, detecção e ações de mitigação). Os modos de falha podem ser priorizados de acordo com sua importância e a priorização pode ser baseada apenas na classificação da severidade ou pode ser combinada com outras medidas de importância [3].

Para que este tipo de análise de risco tenha sucesso na aplicação, é necessário que haja informações sobre o sistema a ser analisado e os seus elementos com detalhes suficientes para uma avaliação das maneiras pelas quais cada elemento pode falhar e as consequências em caso afirmativo [2].

Para que haja análise de criticidade e priorização das ações, aplica-se o Índice de Severidade (S) e o Índice de Ocorrência (O) em cada causa provável de modo de falha. A severidade está relacionada ao efeito e considera os impactos e os danos resultantes da falha, apresentando uma escala de variação de 1 a 5. Quanto maior a severidade, maior o dano associado. A Tabela 1 apresenta a classificação do Índice de Severidade, sua respectiva categoria e os danos associados a pessoas e ao meio ambiente. Essa classificação está de acordo com o item Análise de Risco Semiquantitativa (SQRA) apresentado em [4].

Tabela 1 – Índice de Severidade (S). Fonte: Adaptado de [4]

Categoria		Dano Relacionado à Pessoas	Dano Relacionado ao Meio Ambiente
1	Pequena	Não há perda de vidas.	Graves consequências ambientais.
2	Moderada	Pode haver perda direta de vidas devido a inundações, embora em uma extensão limitada, por pedestres ou habitações isoladas.	A avaria com grandes descargas a jusante resulta em danos incrementais limitados à propriedade e/ou ao ambiente.
3	Grave	A perda de vidas esperada em função da dificuldade de alertar populações menores próximas (2 horas da chegada) seria na faixa de 10 a 100.	As descargas a jusante resultam em danos significativos para a propriedade e/ou para o ambiente.
4	Severa	Grande perda de vidas (na faixa de 100 a 1.000) seria esperada devido a dificuldades em alertar e evacuar a população para grandes centros populacionais a uma distância média.	As descargas a jusante resultam em danos consideráveis para a propriedade e/ou para o ambiente.
5	Catastrófica	Uma perda muito alta (superior a 1.000) de vidas diretas seria esperada devido à existência de grandes populações muito próximas ao pé da barragem (>10.000 habitantes e < 30 minutos de chegada).	As descargas a jusante resultam em danos materiais e/ou ambientais extremamente elevados.

Já o Índice de Ocorrência (O) está relacionado à causa e representa a probabilidade de ocorrência da anomalia que resultará em uma falha, ou seja, a frequência com que essas falhas podem ocorrer durante a obra. Nesse sentido, quanto maior o índice, maior a probabilidade de ocorrência da falha. Esse índice também apresenta uma escala de variação indicada na Tabela 2 e está de acordo com o item Análise de Risco Semiquantitativa (SQRA) apresentado em [4].

Tabela 2 – Índice de Ocorrência (O). Fonte: Adaptado de [4]

Categoria		Ocorrência/ Probabilidade
1	Remota	A probabilidade anual de falha é mais remota que 10^{-6} (1/1.000.000). Vários eventos devem ocorrer simultaneamente ou em série para causar a falha, e a maioria, tem probabilidade desprezível.
2	Baixa	A probabilidade de falha anual é entre 10^{-5} (1/100.000) e 10^{-6} (1/1.000.000). A possibilidade não pode ser descartada, mas não há evidências convincentes que sugerem que tenha ocorrido ou que existe uma condição/ falha que pode levar à iniciação.
3	Moderada	A probabilidade de falha anual está entre 10^{-4} (1/10.000) e 10^{-5} (1/100.000). A condição fundamental é que evidências indiretas sugerem que é plausível; e as principais evidências tendem mais para o “menos provável” do que “mais provável”.

Categoria		Ocorrência/ Probabilidade
4	Alta	A probabilidade de falha anual é entre 10^{-3} (1/1.000) e 10^{-4} (1/10.000). A condição fundamental é que evidências indiretas sugerem que é plausível; e as principais evidências são mais ponderadas para “mais provável” do que “menos provável”.
5	Muito alta	A probabilidade de falha anual é mais frequente (maior) do que 10^{-3} (1/1.000). Há evidências diretas ou substanciais indiretas que sugerem que a falha começou ou provavelmente ocorrerá em breve.

Para cada item listado, a equipe multidisciplinar designada para o estudo analisou se ele é crível ou não de ocorrer e para definição dos Índices de Severidade (S) e de Ocorrência (O). A multiplicação desses dois índices resulta no Índice de Criticidade (IC). Com base nessa análise, os níveis de risco foram definidos por meio da matriz que é resultado desta análise de risco, a qual associa cada nível de risco a uma categoria e a uma prioridade.

Ainda, são descritos em cada cenário de causa provável de modo de falha os itens “prevenção”, “detecção” e “ações” a fim de elaborar um plano de ação simplificado, estabelecido para o controle de cada tópico identificado. O item “prevenção” refere-se às medidas que podem ser adotadas durante a execução da obra para evitar a ocorrência das falhas analisadas, geralmente relacionadas às boas práticas de engenharia, incluindo o cumprimento das diretrizes estabelecidas no projeto, das especificações técnicas e do controle rigoroso da execução.

O item “detecção” refere-se às atividades destinadas à identificação de possíveis falhas, sendo, em sua maioria, ações rotineiras já previstas no plano de manutenção da barragem. Essas atividades incluem inspeções visuais e o monitoramento por meio de instrumentação instalada, permitindo a detecção precoce de alterações que possam comprometer a estabilidade do barramento. Por fim, lista-se no item “ações”, as medidas de recomendações a serem tomadas quando da incidência da falha.

De modo geral, buscou-se listar todos os cenários específicos que poderiam ocorrer durante a execução da berma drenante a jusante da barragem e que pudessem gerar algum tipo de impacto estrutural sobre o barramento. Isto é, o estudo não teve como objetivo identificar os fatores de risco associados à execução da obra em si e que não gerassem danos à barragem, como a possibilidade de instabilizações locais na berma no decorrer da execução, falhas decorrentes de erros de compactação ou danos à instrumentação que será instalada durante a obra para monitoramento após a sua conclusão. Também não foi escopo desta análise considerar cenários futuros relacionados à má execução da obra ou falhas construtivas que possam ocorrer.

4. APLICAÇÃO FMECA

Para início da aplicação da metodologia, para o sistema de análise da obra da berma drenante foram identificados quatro subsistemas principais e sua função conforme exibido na Tabela 3.

Tabela 3 – Subsistema e sua finalidade

Sistema	Subsistema	ID
Obra da Berma Drenante	Rebaixamento do lençol freático	A.1
	Escavação	A.2
	Execução do aterro	A.3
	Instrumentação da obra	A.4

Após a definição do sistema e subsistemas, eles foram decompostos em dez itens de cenário provável de modo de falha (IDC), e foram caracterizadas suas funções, identificados seus modos de falha e suas possíveis causas e efeitos. O item "função" representa o papel que o subsistema em questão desempenha na obra. O item "falha" está associado ao modo de falha, de modo que o subsistema seja impedido de exercer a função a ele definida durante a obra. "Efeito" representa a consequência da falha e sua influência na estrutura do barramento e a "causa" refere-se principalmente às questões relacionadas aos erros de execução e às imprevisibilidades da obra.

4.1 Subsistema Rebaixamento do Lençol Freático

O subsistema de rebaixamento do lençol freático tem a função de garantir condições seguras para escavação da berma e preservar a estabilidade das estruturas adjacentes. Foram identificados três modos de falha potenciais.

O primeiro cenário refere-se à falha rebaixamento além da cota prevista (IDC A.1.1), que pode provocar recalques excessivos na região do pé da barragem em função de alterações do regime de fluxo subterrâneo, causando variações imprevistas de permeabilidade dos materiais ou operação inadequada do sistema de bombeamento. Esse cenário foi classificado como risco baixo, sendo recomendados controle operacional, monitoramento geotécnico e possibilidade de ajuste imediato do bombeamento.

O segundo cenário corresponde ao não atingimento da cota de rebaixamento prevista e/ou ainda à desativação temporária dos drenos existentes durante a obra (IDC A.1.2). Tal condição pode manter o solo saturado, reduzindo sua resistência ao cisalhamento e aumentando o potencial de instabilidade do talude de jusante. As principais causas incluem erros executivos, insuficiência do sistema de ponteiras filtrantes, falhas de bombas ou eventos climáticos extremos. Este cenário foi classificado como risco médio, exigindo redundância de equipamentos, estoque de bombas reserva e acompanhamento intensivo.

O terceiro cenário deste subsistema considera o desligamento intempestivo do sistema de rebaixamento durante a escavação (IDC A.1.3), ocasionando elevação brusca do nível freático e aumento da percolação pela fundação, com possibilidade de surgimento de gradientes hidráulicos elevados e erosão interna. As principais causas incluem erros executivos com o não atendimento aos procedimentos de desligamento gradual e falhas de bombas. Também classificado como risco médio, demanda procedimentos formais de desligamento gradual, sistemas redundantes de energia e pronta recomposição da escavação, se necessário.

4.2 Subsistema Escavações

As escavações possuem a função de permitir a implantação do tapete drenante gerando o disciplinamento da água e execução de demais elementos da berma sem comprometer a estabilidade da barragem existente. Três cenários principais foram identificados.

O primeiro refere-se a danos estruturais ao talude de jusante (IDC A.2.1), decorrentes de escavações fora dos limites previstos em projeto. Tal situação pode provocar instabilidades localizadas no pé da barragem. O risco foi classificado como médio, sendo recomendável controle topográfico permanente e execução em trechos curtos e sequenciais.

O segundo cenário envolve a instabilidade localizada do talude de jusante (IDC A.2.2), causada por parâmetros de resistência inferiores aos considerados em projeto. Como consequência, podem ocorrer recalques excessivos ou deformações progressivas. Esse modo de falha também foi classificado como risco médio, recomendando-se investigações geotécnicas complementares e possibilidade de reaterro corretivo.

O terceiro cenário diz respeito à percolação pela fundação ou pelo maciço (IDC A.2.3), causada por interceptação de caminhos preferenciais de fluxo ou pela redução indevida do comprimento de percolação em função das escavações. Tal condição pode desencadear erosão interna pela fundação ou pelo maciço, sendo classificada como risco médio. Como medidas preventivas destacam-se investigações prévias adicionais, tratamentos localizados da fundação e monitoramento de turbidez e vazão percolada.

4.3 Subsistema Execução do Aterro

A etapa de execução do aterro tem como objetivo garantir a adequada conformação e compacidade da berma drenante, sem introduzir efeitos adversos à estrutura existente.

Foi identificado um cenário relacionado à instabilidade do talude de jusante causada por vibrações excessivas do maquinário de compactação (IDC A.3.1), resultando em possíveis recalques, deslocamentos laterais ou perda localizada de resistência. Apesar de considerado pouco crível, o evento foi mantido na análise por precaução e classificado como risco baixo. Recomenda-se uso de equipamentos compatíveis, controle tecnológico da compactação e inspeção visual contínua.

4.4 Subsistema Instrumentação da Obra

O subsistema de instrumentação tem papel essencial no monitoramento em tempo real das condições hidráulicas e estruturais durante a obra. Foram identificados três cenários potenciais.

O primeiro refere-se à falha ou ausência de monitoramento dos medidores de nível d’água (IDC A.4.1), o que pode comprometer o controle do rebaixamento do lençol freático e atrasar a percepção de anomalias. As causas incluem falhas de sensores, transmissão de dados ou ausência de leituras. O risco foi classificado como médio.

O segundo cenário corresponde à falha dos instrumentos de deslocamento (IDC A.4.2), prejudicando a detecção de movimentações do maciço durante as escavações.

As causas também incluem falhas de sensores, transmissão de dados ou ausência de leituras, sendo também foi classificado como risco médio.

O terceiro cenário envolve falha no sistema de drenagem existente durante a obra (IDC A.4.3), especialmente em situações de desvio ou remanejamento provisório de tubulações coletoras. A consequência esperada seria o acúmulo de água no pé da barragem, saturação do solo e surgimento de instabilidades localizadas. Este cenário igualmente recebeu classificação de risco médio.

Para todos os casos relacionados à instrumentação, recomendam-se cuidados de instalação e comissionamento, redundância de sensores críticos, validação diária dos dados e rápida substituição de equipamentos defeituosos.

5. Resultados

A Tabela 4 apresenta a matriz de criticidade resultante da metodologia FMECA, correlacionando os Índices de Ocorrência e Severidade para os dez cenários possíveis de modo de falha (IDC) identificados. O mapeamento do risco é estratificado em três níveis: baixo (aceitável), representado pela cor verde; médio (razoável), em amarelo; e alto (intolerável), em vermelho, indicando a necessidade prioritária de medidas de controle ou mitigação.

Observa-se que 80% dos possíveis cenários de falha identificados foi classificado como risco médio e 20% como baixo, não resultando em risco alto e categorizado com intolerável, o que se conclui que a obra foi corretamente projetada com o foco na mitigação dos riscos.

Tabela 4 – Matriz de riscos gerada para a obra da berma drenante

Índice de Ocorrência (O)		1 Pequena	2 Moderada	3 Grave	4 Severa	5 Catastrófica
Muito alta	5					
Alta	4					
Moderada	3	A.1.1	A.1.2, A.2.2, A.4.1, A.4.2, A.4.3	A.2.3 A.2.1		
Baixa	2			A.1.3		
Remota	1	A.3.1				

Índice de Severidade (S)

Com relação aos modos de falha os respectivos riscos associados aos possíveis cenários identificados nesse estudo, tem-se a Tabela 5. Dos dez itens estudados,

apenas dois foram relacionados ao modo de falha de erosão interna, e ambos classificados com nível de risco médio, os outros oito foram associados ao modo de falha de instabilidade, sendo dois deles com nível de risco baixo e os outros seis com nível de risco médio. Os cenários identificados estão relacionados, principalmente, à estabilidade do talude de jusante da barragem, em razão da localização da obra da berma drenante que será executada a jusante do barramento tendo contato direto com o maciço existente. A alteração da geometria nesta região gera a redução de suporte no pé do talude e variações piezométricas. A possibilidade de ocorrência de erosão interna está associada a alteração dos gradientes hidráulicos e interceptação de fluxos subterrâneos. Considera-se que o modo de falha por galgamento não representa um risco significativo durante a fase de execução das obras, uma vez que as atividades associadas à construção da berma, especificamente, não contribuem para a ocorrência desse tipo de falha.

Tabela 5 – Classificação dos modos de falha em função dos níveis de risco

Modo de falha	Identificação do item	Nível de risco
Instabilidade	-	Alto
	A.1.2; A.2.1; A.2.2; A.4.1; A.4.2; A.4.3	Médio
	A.1.1; A.3.1	Baixo
Erosão Interna	-	Alto
	A.1.3; A.2.3	Médio
	-	Baixo

6. Estratégias de Controle de Riscos e Soluções de Engenharia

A mitigação dos riscos associados à implantação da berma drenante fundamenta-se na aplicação de barreiras preventivas, sistemas de detecção precoce e protocolos de resposta a emergências.

Com relação às ações preventivas que visam neutralizar as causas raízes dos cenários de falha identificados, tem-se que a execução das frentes de serviço deve obedecer rigorosamente às cotas e limites de projeto, sempre executando a obra em setores, evitando sobre-escavações que possam comprometer a estabilidade do talude de jusante; para os sistemas de rebaixamento de lençol freático, é mandatória a manutenção de bombas de reserva em canteiro, além de fontes de alimentação elétrica redundantes para assegurar a continuidade do bombeamento; realização periódica de testes em geradores e sistemas de bombeamento para garantir a disponibilidade imediata em cenários de falha do sistema principal.

Para a detecção precoce de comportamentos anômalos, identificar desvios de em tempo real é fundamental, por isso, um sistema de monitoramento automatizado é obrigatório durante a fase de obra. Foi recomendada a utilização combinada de piezômetros instalados no maciço da barragem e em sua fundação; medidores de nível d'água em pontos estratégicos próximos ao sistema de rebaixamento do nível freático e no interior das escavações; medidores de deslocamento de alta precisão do tipo GNSS; inspeções visuais diárias realizadas por especialistas capazes de

identificar de indicadores de instabilidade e erosão interna, como trincas de tração, surgências de água com transporte de sólidos ou recalques diferenciais; utilização de sistema automatizado de alarmes; além dos marcos superficiais, piezômetros e indicadores de nível de água já pertencentes ao monitoramento da barragem.

Para um monitoramento geotécnico confiável é necessário que desde o projeto, aquisição dos instrumentos, testes de bancada, instalação, leitura zero, conexão no dispositivo, transmissão do dado, intepretação e acompanhamento do monitoramento seja feito por equipe especializada.

As medidas corretivas são acionadas quando o sistema de monitoramento atinge níveis de alerta, visando ação imediata como reestabelecer o nível de segurança da estrutura. Para isso, indica-se a utilização de bermas de equilíbrio provisórias ou reaterro imediato de cavas de escavação caso sejam detectados movimentos de massa ou instabilidades incipientes no pé do talude; suspensão imediata das atividades de escavação em períodos de pluviosidade intensa (cerca de 30 mm/h), acompanhada da proteção das superfícies expostas com materiais impermeáveis (mantas ou reaterro); em regiões onde o rebaixamento do nível freático projetado não seja atingido, as soluções preveem o ajuste imediato de fluxo, substituição de bombas ou a instalação de ponteiras filtrantes adicionais para reduzir as pressões neutras.

7. CONCLUSÕES

O presente estudo cumpriu seu objetivo primordial de avaliar os modos de falha potenciais associados à execução de uma berma drenante em uma barragem de terra em operação, utilizando a metodologia FMECA.

A análise permitiu identificar cenários críticos, classificar riscos e propor medidas mitigadoras, fundamentando a viabilidade técnica da intervenção planejada. Os resultados indicam que foram mapeados dez cenários potenciais de falha, com predominância de níveis de risco médio e razoável. A ausência de riscos classificados como altos ou intoleráveis confirma a viabilidade da obra, desde que mantida a atenção técnica permanente. As ações a serem realizadas durante a execução da obra incluem inspeções visuais por profissionais qualificados e o monitoramento por meio de instrumentação automatizada instalada, permitindo a detecção precoce de alterações que possam comprometer a estabilidade do barramento. Em outro escopo, foi desenvolvido o Plano de Emergência para a execução da obra que estabelece os gatilhos a serem analisados que podem desencadear a alteração do nível de risco da estrutura e as respectivas ações atreladas a categoria enquadrada.

Os mecanismos críticos e modos de falha mais representativos concentram-se na instabilidade do talude de jusante e na erosão interna decorrente da alteração dos gradientes hidráulicos durante a fase de escavação. Nesse contexto, as ações que visam mitigar os riscos incluíram a supervisão rigorosa do sistema de rebaixamento do lençol freático e a segmentação da obra em setores que se mostrou uma medida estratégica eficaz, reduzindo a exposição simultânea do maciço a múltiplas frentes abertas e limitando a magnitude de eventuais anomalias. Complementarmente, as inspeções visuais em conjunto com o sistema de monitoramento geotécnico em tempo

real com a definição, acompanhamento dos níveis de controle e classificação da estrutura nos níveis de segurança consolidaram-se como elementos essenciais para a detecção precoce de desvios e suporte às tomadas de decisão.

A aplicação da ferramenta FMECA demonstrou ser adequada e robusta para a análise de riscos em intervenções temporárias de alta complexidade, permitindo uma abordagem integrada entre projeto, construção e gestão de emergências.

Em suma, conclui-se que a implantação da berma drenante pode ser conduzida com segurança, servindo como modelo para obras corretivas em jusante de estruturas de terra. O sucesso da intervenção depende diretamente da observância rigorosa dos controles executivos e de uma gestão de riscos ativa, reiterando que a segurança de barragens em operação exige a integração contínua entre as fases de projeto e monitoramento de campo.

8. PALAVRAS-CHAVE

FMECA; Análise de Risco; Barragem de Terra; Estabilidade Geotécnica; Obra de Berma Drenante; Obra a Jusante.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a G5 Engenharia pela oportunidade da atuação neste projeto e desenvolvimento deste trabalho.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MELLO, Flavio Miguez de (Coord./Sup.); PIASENTIN, Corrado (Ed.) – “A história das barragens no Brasil, séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens”. Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 524 p.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 31010:2021: “Gestão de riscos – Técnicas para o processo de avaliação de riscos”. Rio de Janeiro, 2021.

[3] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60812:2018: “Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)”. 3. ed. Geneva: IEC, 2018.

[4] USACE, UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS – “Best practices in dam and levee safety risk analysis”. Washington, D.C., 2019.

	**Isabela Grossi da SILVA** Engenheira Civil formada pela Universidade Federal do Paraná pela qual também obteve título de mestre em Geotecnia. Possui pós-graduação em Geotecnia e Segurança de Barragens e Pilhas pelo Instituto Minere. Detém experiência em projeto, instalação e automação de instrumentos e, atualmente, atua no desenvolvimento de projetos de barragens, diques, contenção e demais estruturas geotécnicas.
	**Joaquim Monteiro Garcez DUARTE** Engenheiro Civil formado pela Universidade Federal do Paraná com mestrado em Geotecnia pela Universidade de São Paulo (USP) e especialista em Obras Subterrâneas pela Escola Politécnica de Zurique (Suíça). Possui expertise em Engenharia Geotécnica, com ênfase na área de Obras Subterrâneas, em projetos de infraestrutura no Brasil e no exterior. Atualmente exerce a função de Diretor Técnico de Engenharia Civil da G5 Engenharia.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

ANÁLISE DE RISCO BASEADO NO ESTADO DE CONSISTÊNCIA COMO FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO: UM ESTUDO DE 19 BARRAGENS NO CEARÁ

Lívia Maria de Sousa POMPEU
Engenheira Civil - Cogerh

Itamara Mary Leite de Menezes TAVEIRA
Engenheira Civil, M. Sc - Cogerh

Marilia Nunes de QUEIRÓS
Engenheira Civil - Cogerh

Taigo Correia PINHO
Engenheiro Civil - Cogerh

Rafael Mota de OLIVEIRA
Geólogo, Dr.- Cogerh

RESUMO

A avaliação das propriedades geotécnicas dos materiais que compõem barragens de terra em regiões semiáridas é fundamental para análise de riscos estruturais, associados às variações de umidade e condições climáticas extremas. Este trabalho analisa a consistência dos solos de 19 barragens instrumentadas no estado do Ceará, monitoradas pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (Cogerh). A análise baseou-se em dados de ensaios laboratoriais de caracterização, em amostras coletadas no coroamento e talude de jusante dessas barragens, adotando-se os valores médios por estrutura. Com base nesses dados, avaliou-se o estado atual de consistência dos maciços por meio do Índice de Consistência (IC) e a determinação da margem de segurança entre a umidade natural e o Limite de Liquidez (LL) dos solos, estado crítico no qual os solos apresentam baixa resistência ao cisalhamento. Os resultados indicaram que todas as estruturas possuem IC superior a 1,0 (1,30 a 2,80) e margem de segurança superior a 13% de umidade, até que se alcance o LL. Conclui-se que os resultados mostraram-se coerentes com o comportamento esperado para barragens localizadas no semiárido, caracterizado por elevados valores de IC's, evidenciando processo avançado de secagem dos materiais analisados, bem como uma margem de segurança significativa em relação ao LL, indicando segurança contra a saturação imediata, embora os valores extremos de ressecamento sinalizem riscos de fissuração por retração, potencialmente associados ao modo de falha por instabilidade.

ABSTRACT

The evaluation of the geotechnical properties of earth dam materials in semiarid regions is essential for analyzing structural risks associated with variations in moisture content and extreme weather conditions. This study analyzes the consistency of the soils at 19 instrumented dams in the state of Ceará, monitored by the Water Resources Management Company (Cogerh). The analysis was based on data from laboratory characterization tests conducted on samples collected from the crest and downstream slope of these dams, adopting mean values for each structure. The consistency state was evaluated using the Consistency Index (CI) and the safety margin between the natural moisture content and the Liquid Limit (LL), a critical state associated with low shear strength. The results indicated that all structures have a CI greater than 1.0 (1.30 to 2.80) and a safety margin of more than 13% moisture content until the LL is reached. It can be concluded that the results were consistent with the expected behavior for dams located in the semi-arid region, characterized by high CIs values, indicating an advanced drying process of the analyzed materials, as well as a significant safety margin relative to the LL, suggesting low immediate susceptibility to strength loss due to saturation. However, severe desiccation may promote shrinkage cracking, potentially associated with instability failure mechanisms.

1. INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei nº 12.334 de 2010, alterada pela Lei nº 14.066 de 2020, estabelece a seguinte definição para segurança de barragem: condição que vise a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente" [1][2], ou seja, a segurança de barragens é o conjunto de medidas técnicas, operacionais, legais e ambientais com a finalidade de garantir a estabilidade da estrutura, a adequada operação e manutenção, além de dialogar sobre a gestão de riscos, com o objetivo de proteger vidas humanas, comunidades, patrimônios públicos e privados, sistemas de abastecimento, energia e irrigação e o meio ambiente.

No contexto de barragens de terra, a garantia da estabilidade da estrutura está diretamente ligada ao comportamento dos solos de materiais finos (siltes e argilas) devido à função desempenhada na composição dos núcleos impermeáveis e demais zonas compactadas do maciço. Em regiões semiáridas, onde as estruturas estão submetidas a intensos ciclos de secagem e umedecimento ao longo do ano, as propriedades de consistência dos solos finos assumem papel fundamental no comportamento hidráulico e mecânico dos maciços compactados, influenciando diretamente os índices de consistência, sua resistência, deformabilidade e susceptibilidade à formação de fissuras.

Entre os parâmetros mais utilizados para a caracterização de solos argilosos destacam-se os Limites de Atterberg, responsáveis por definir as transições entre os diferentes estados físicos do material em função da variação do teor de umidade. Esses limites permitem avaliar a plasticidade dos solos e inferir aspectos relevantes relacionados à estabilidade e ao desempenho geotécnico das estruturas de terra. Alterações no teor de umidade podem modificar significativamente a resistência ao cisalhamento dos materiais, favorecendo processos de retração, surgimento de trincas e formação de caminhos preferenciais de percolação [3][4].

Nesse cenário, o Índice de Consistência (IC) apresenta-se como um importante indicador do estado atual dos solos compactados em relação aos seus limites de plasticidade e liquidez, permitindo avaliar sua condição de rigidez, plasticidade e proximidade de estados críticos associados à redução da resistência não drenada. A utilização desse parâmetro possibilita interpretações relevantes acerca da segurança geotécnica de maciços compactados, sobretudo quando associada à análise da margem entre o teor de umidade natural e o Limite de Liquidez (LL) dos materiais.

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar o estado de consistência dos materiais constituintes de barragens de terra monitoradas pela Cogerh, localizadas em diferentes regiões do estado do Ceará, a partir da avaliação dos Limites de Atterberg, do Índice de Plasticidade (IP) e do Índice de Consistência (IC), buscando discutir a relação entre o teor de umidade natural dos maciços, o comportamento geotécnico dos solos compactados e os possíveis impactos associados aos processos de ressecamento e perda de resistência, contribuindo para a compreensão das condições de estabilidade e segurança dessas estruturas em ambientes semiáridos.

Embora o Índice de Consistência seja amplamente utilizado na Mecânica dos Solos para caracterização do estado dos materiais, sua aplicação como ferramenta de apoio

ao diagnóstico preliminar de risco e à priorização de inspeções em barragens de terra ainda é pouco explorada. Diferentemente de estudos anteriores, voltados à investigação da relação entre o Índice de Consistência e a resistência não drenada em escala de amostras individuais, este trabalho propõe a interpretação conjunta do Índice de Consistência (IC) e da margem entre o teor de umidade natural e o Limite de Liquidez (Δw) para identificação de diferentes perfis de vulnerabilidade em um conjunto de barragens, considerando tanto a suscetibilidade à fissuração por retração quanto à perda de resistência decorrente do aumento da umidade. Dessa forma, busca-se demonstrar o potencial desses parâmetros como indicadores complementares para subsidiar a avaliação geotécnica, o diagnóstico preliminar de risco e a priorização de inspeções em barragens instrumentadas localizadas em regiões semiáridas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Limites de Atterberg e Comportamento dos Solos Argilosos

A presença de material fino na composição de solos não garante que a caracterização de uma amostra seja dada unicamente pela distribuição granulométrica das partículas que o compõem [3], sendo necessária a definição de suas características quanto à plasticidade, a qual varia de acordo com o teor de umidade e com a composição química e mineralógica do solo [4].

A plasticidade, definida por [4] como uma propriedade dos solos de serem moldados em diferentes teores de umidade sem que haja variação de volume, é oriunda da natureza coesiva da fração fina dos solos, causada pela interação com a água adsorvida ao redor das partículas de argila [5]. Segundo [3], como forma de simplificar a identificação e análise do comportamento da fração argila dos solos, visto que o estudo dos argilominerais alcança um nível de complexidade considerável, a influência das partículas argilosas pode ser avaliada de maneira indireta, com base no comportamento do solo frente à presença de água em diversos teores.

A relação do teor de umidade com o comportamento mecânico dos solos foi sistematizada por Albert Atterberg, no início do século XX, por meio da definição de limites de consistência, conhecidos como Limites de Atterberg, que estabelecem as fronteiras entre os diferentes estados físicos em que um solo coesivo pode, a partir da variação de umidade, transitar desde uma condição sólida, quando seco, até um estado de fluidez líquida em teores mais altos de umidade. Os procedimentos para determinação dos limites se dão por procedimento em laboratório devidamente estabelecidos pelas normas NBR 6459 [6] para o Limite de Liquidez e NBR 7180 [7] para o Limite de Plasticidade. O Limite de Plasticidade (LP) representa o teor de água abaixo do qual o solo deixa de se deformar plasticamente sem ruptura, passando ao estado semissólido ou sólido. O Limite de Liquidez (LL), por sua vez, corresponde ao teor de água a partir do qual o solo perde resistência ao cisalhamento e passa a se comportar como um fluido viscoso, com capacidade de suporte desprezível.

Conforme [5], esses dois parâmetros são fundamentais para a classificação geotécnica e avaliação do comportamento dos solos finos, os quais são frequentemente empregados na construção de maciços de barragens de terra,

principalmente nas zonas de núcleo, em razão de sua baixa permeabilidade e capacidade de compactação, que garantem desempenho hidráulico da estrutura [8].

A diferença entre o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade define o Índice de Plasticidade (IP), que expressa o intervalo de teores de água no qual o solo exibe comportamento plástico. Para o caso de argilas, quanto maior o IP maior a compressibilidade deste solo e seguindo a classificação de Jenkins pode assumir a classificação de fracamente plástico (1<IP≤7), medianamente plástico (7<IP≤15) ou altamente plástico (IP>15) [4]. De acordo com o conceito de atividade dos solos, dado por [9], materiais com IP elevado são mais susceptíveis a variações volumétricas e tal comportamento está intrinsicamente relacionado ao potencial de expansão ou retração de solos argilosos, tornando-os particularmente vulneráveis em ambientes sujeitos a ciclos alternados de umedecimento e secagem, condição recorrente no semiárido brasileiro.

No contexto de barragens de terra, os limites de consistência ganham relevância ainda maior, pois os maciços compactados ficam permanentemente expostos às variações climáticas sazonais. Conforme apontam [10], em períodos prolongados de estiagem, o ressecamento do solo promove a perda de umidade, induzindo a retração volumétrica e o desenvolvimento de fissuras, que constituem caminhos preferenciais para a percolação e comprometem a integridade hidráulica e estrutural da barragem. Em sentido contrário, [11] demonstraram experimentalmente que a resistência não drenada de solos finos é fortemente relacionada ao Limite de Liquidez, diminuindo à medida que o LL aumenta. Dessa forma, a resistência pode ser relacionada à proximidade entre o teor de umidade atual e o LL, sofrendo uma redução acentuada conforme essa diferença diminui.

2.2 Índice de Consistência como Indicador do Estado de Resistência e Segurança de Maciços Compactados

Para avaliar o estado atual de um solo coesivo em relação aos seus limites de Atterberg, pode utilizar-se o Índice de Consistência (IC), definido pela expressão dada por [5]:

$$IC = \frac{LL - w}{LL - LP}$$

onde w representa o teor de água natural do solo, LL o Limite de Liquidez e LP é o Limite de Plasticidade.

O IC fornece uma medida adimensional da posição do estado atual do solo em relação a sua condição de plasticidade, permitindo inferências e dependência sobre seu comportamento na presença de água em relação à sua resistência ao cisalhamento e condições de deformabilidade [3].

A partir da equação que determina o IC, quando esse índice assume o valor igual a zero, o teor de água natural coincide com o Limite de Liquidez, indicando que o solo se encontra no limiar do estado líquido, com resistência ao cisalhamento próxima de zero. Para IC igual a 1,0, o teor de água natural corresponde ao Limite de Plasticidade, marcando a transição entre o estado plástico e o estado semissólido. Valores de IC superiores a 1,0 indicam que o solo se encontra, no estado semissólido ou sólido, e

conforme [4], pode ser caracterizado como um material de consistência dura e com maior resistência ao cisalhamento, com resistência a compressão simples de ordem superior a 4kg/cm².

Do ponto de vista da segurança de maciços compactados, o IC é um indicador direto da proximidade do estado atual do solo em relação ao limite crítico representado pelo LL. Valores mais elevados de IC indicam maior margem de segurança contra deformações plásticas e instabilidades, uma vez que o solo se afasta de estados de baixa resistência cisalhante. Em situações de solos com predominância de comportamento de materiais finos, apresentando IC = 1, (umidade igual ao Limite de Plasticidade) a resistência não drenada pode chegar a ser 100 vezes superior à de solos com IC = 0 (umidade no Limite de Liquidez). [12]

Nesse sentido, a consideração do IC em relação à resistência de um aterro apresenta relação direta com a variação de umidade do solo e, consequentemente, com os períodos de variação climática. Isso leva ao entendimento de que em regiões semiáridas, como o estado do Ceará, os solos expostos ao clima durante períodos de seca estão sujeitos a maiores ressecamentos e, consequentemente, a índices de consistência mais elevados. [10] ressaltam que em regiões com períodos secos bem definidos, os aterros são mais suscetíveis ao surgimento de fissuras devido ao ressecamento do solo. Portanto, embora o elevado IC represente um distanciamento do limite crítico de liquidez, o ressecamento excessivo pode comprometer a integridade do maciço através da descontinuidade estrutural gerada pelas trincas.

2.3 Modos de Falha em Barragens de Terra

Os modos de falha em barragens podem ser classificados, de forma geral, em três grandes grupos: (i) modos de falha hidráulicos, associados a eventos como galgamento; (ii) modos de falha geotécnicos, relacionados ao comportamento dos materiais constituintes e da fundação, incluindo erosão interna, liquefação e instabilidade de taludes; e (iii) modos de falha estruturais, que envolvem problemas em estruturas de concreto, fundações ou dispositivos hidráulicos, como vertedouros e tomadas d'água [13].

Dentre esses, destaca-se o modo de falha por instabilidade, especialmente relevante em barragens de terra e enrocamento, onde os taludes são elementos críticos para a segurança global da estrutura. A instabilidade de taludes ocorre quando as forças resistentes ao cisalhamento do solo são superadas pelas forças solicitantes, resultando em deslocamentos progressivos ou ruptura súbita do maciço [14].

A instabilidade de taludes pode ocorrer devido a variações rápidas do nível do reservatório, saturação do maciço e aumento de poropressões, fatores que reduzem a resistência do solo e podem levar à formação de superfícies de ruptura.

Além disso, o aparecimento de trincas pode indicar a formação de superfícies potenciais de ruptura, funcionando como zonas de instabilidade no maciço. Em estágios mais avançados, podem ser observados recalques, abatimentos localizados, escorregamentos superficiais e deslocamentos visíveis, os quais, se não tratados, podem evoluir para uma ruptura da barragem [14].

Dessa forma, o monitoramento contínuo dos taludes, incluindo inspeções visuais e instrumentação geotécnica aliado ao conhecimento e caracterização dos materiais constituintes do maciço é fundamental para a detecção precoce de anomalias associadas à instabilidade. Nesse sentido, a formação de trincas por retração decorrentes do ressecamento severo, comum em áreas do semiárido brasileiro, pode configurar-se como um precursor de instabilidade em maciços de barragens, uma vez que essas aberturas estabelecem caminhos preferenciais de percolação que podem deflagrar processos de erosão interna e comprometer a integridade do maciço. A identificação e interpretação adequada desses sinais permitem a adoção de medidas corretivas em tempo hábil, reduzindo significativamente o risco de falha da estrutura.

3. METODOLOGIA

O presente estudo adota uma abordagem quantitativa baseada na análise de dados de ensaios de caracterização geotécnica de solos pertencentes a maciços de 19 barragens de terra localizadas em diferentes regiões do estado do Ceará, todas monitoradas pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (Cogerh) e dotadas de instrumentação geotécnica. Os dados são oriundos de campanhas de investigação e ensaios geotécnicos realizados por meio de contrato de prestação de serviços voltado à investigação geotécnica e se insere no contexto da análise de riscos baseada em propriedades de consistência, explorando a relação entre o estado atual de umidade dos maciços e os limites de consistência dos materiais que os constituem.

Os dados utilizados foram obtidos a partir de ensaios de laboratório realizados em amostras de solo coletadas no coroamento e/ou no talude de jusante, contemplando um ou mais pontos de coleta em cada barragem. A seleção dessas áreas para coleta justifica-se, primordialmente, pela maior acessibilidade técnica para a coleta de amostras em estruturas em plena operação, uma vez que o coroamento e o talude de jusante permitem investigações diretas sem interferências no nível do reservatório. Além da viabilidade logística, tais regiões representam considerável relevância geotécnica. Conforme destaca [8], o talude de jusante configura-se como uma zona particularmente crítica para a estabilidade do maciço de uma barragem em operação, devido à posição da linha freática e atuação de forças de percolação no interior do maciço.

Em cada barragem, o número de amostras ensaiadas foi variável. Para fins de padronização e comparabilidade entre as estruturas, adotou-se como valor representativo de cada barragem a média aritmética dos resultados obtidos nas amostras coletadas naquela estrutura.

Os ensaios laboratoriais utilizados contemplaram a determinação dos seguintes parâmetros para cada amostra: Teor de Umidade Natural (Wnat), Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP). De acordo com os documentos analisados os ensaios laboratoriais foram executados conforme protocolo normativo, seguindo a NBR 6459 [6] para determinação do LL e NBR 7180 [7] para determinação do LP.

Para cada barragem, foi calculado o IC médio a partir dos valores médios de LL, LP e w obtidos nas amostras representativas da estrutura, conforme procedimento descrito anteriormente. Com base nos valores calculados de IC, os materiais de cada barragem foram classificados segundo os estados de consistência convencionais adotados na literatura geotécnica. Os valores de referência adotados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação do Estado de Consistência (Adaptado de [3]).

IC	Estado de Consistência
< 0,5	Mole
0,5 a 0,75	Média
0,75 a 1,00	Rija
> 1,00	Dura

O Limite de Liquidez, em especial, é reconhecido na literatura geotécnica como um estado crítico de referência, no qual o solo apresenta resistência ao cisalhamento mínima e comportamento assemelhado ao de um fluido viscoso [12] [15]. Dessa forma, complementar ao cálculo do IC, foi determinada, para cada barragem, a margem de segurança entre o teor de umidade natural atual e o Limite de Liquidez do solo, expressa em pontos percentuais de umidade. Essa margem foi calculada pela diferença direta:

$$\Delta w = LL - w$$

Esse parâmetro expressa o acréscimo de umidade que seria necessário para que o material atingisse o estado de consistência correspondente ao Limite de Liquidez, condição associada à mínima resistência ao cisalhamento não drenada. A avaliação dessa margem fornece uma estimativa qualitativa da vulnerabilidade do maciço a eventos de saturação, como cheias excepcionais ou elevações abruptas do nível do reservatório, que poderiam resultar em variações significativas do teor de umidade ao longo do maciço.

Ressalta-se que a análise conduzida neste trabalho é baseada em valores médios de laboratório, obtidos de amostras pontuais, e não contempla a variabilidade espacial tridimensional dos materiais no interior do maciço. Além disso, os dados de teor de umidade natural refletem as condições existentes no momento da coleta das amostras, não necessariamente representando o estado mais crítico já experimentado pelas estruturas ao longo de sua vida útil.

4. ÁREA DE ESTUDO

Para a realização deste estudo, foram utilizados os dados de 19 barragens sob responsabilidade da Cogerh, distribuídas no Estado do Ceará e abrangendo maior parte das regiões hidrográficas, conforme a Figura 1. As estruturas foram selecionadas considerando o tipo de barragem (todas de terra), a presença de instrumentação instalada e a disponibilidade de resultados de ensaios geotécnicos.

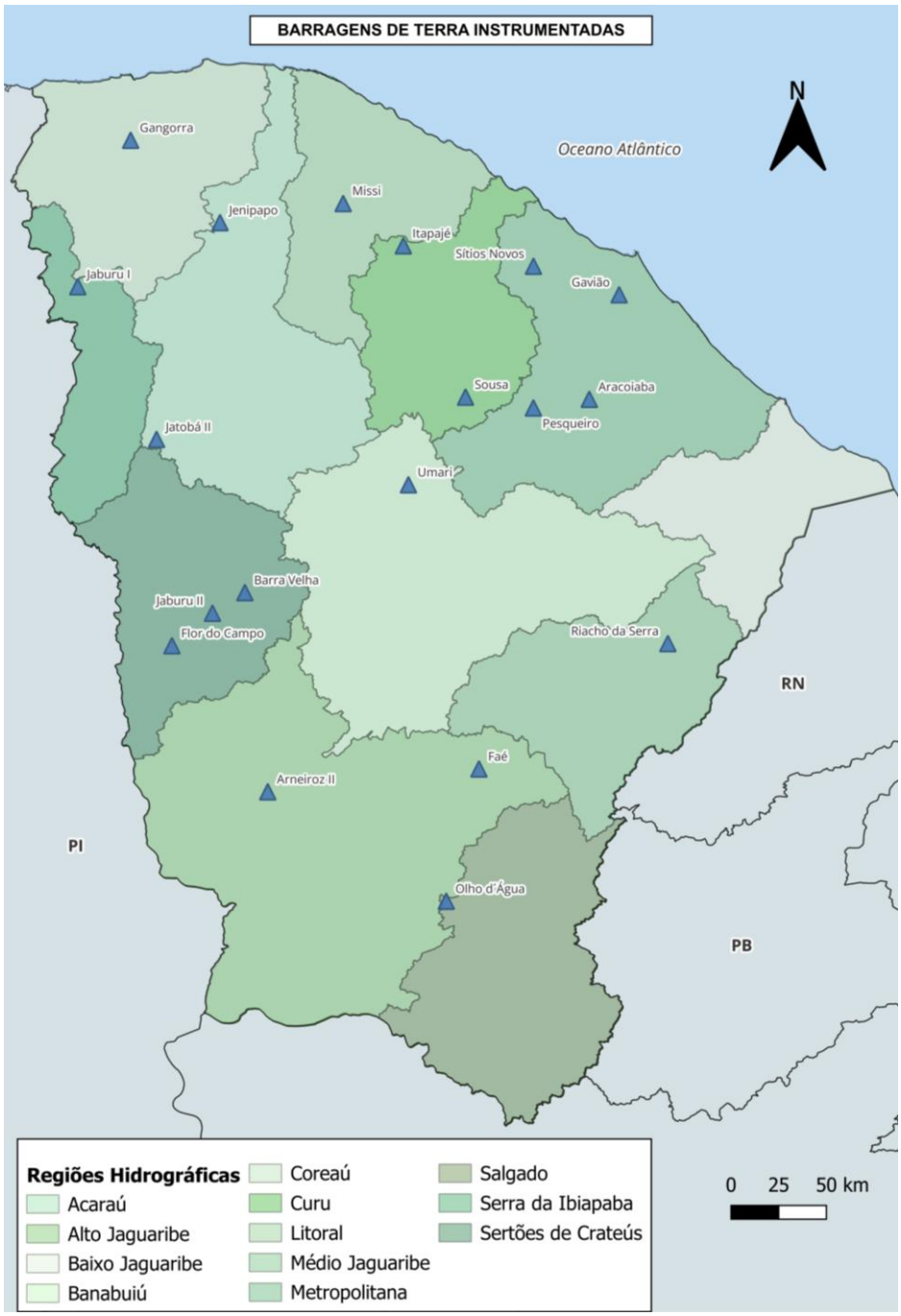


Figura 1 – Localização das Barragens Analisadas

As barragens possuem auscultação através de instrumentos como piezômetros, medidores de nível d'água, medidores de vazão e marcos de recalque. Entre as 19 barragens utilizadas na pesquisa, apresentadas na Tabela 2, destaca-se a barragem Jaburu I, na bacia da Serra da Ibiapaba, que possui a maior quantidade de instrumentos com 65 piezômetros, 3 medidores de nível d'água e 12 medidores de vazão.

Tabela 2- Barragens Analisadas

Barragem	Região Hidrográfica	Município	Volume (hm³)
Jatobá II	Acaraú	Ipueiras	6,24
Jenipapo	Acaraú	Meruoca	4,94
Arneiroz II	Alto Jaguaribe	Arneiroz	178,13
Faé	Alto Jaguaribe	Quixelô	12,42
Umari	Banabuiú	Madalena	30,00
Gangorra	Coreaú	Granja	54,40
Itapajé	Curu	Itapajé	3,91
Sousa	Curu	Canindé	30,84
Missi	Litoral	Miraíma	54,37
Riacho da Serra	Médio Jaguaribe	Alto Santo	23,25
Aracoiaba	Metropolitana	Aracoiaba	163,42
Gavião	Metropolitana	Pacatuba	33,45
Pesqueiro	Metropolitana	Capistrano	10,54
Sítios Novos	Metropolitana	Caucaia	127,95
Olho d'Água	Salgado	Várzea Alegre	19,21
Jaburu I	Serra da Ibiapaba	Ubajara	141,00
Barra Velha	Sertões de Crateús	Independência	99,56
Flor do Campo	Sertões de Crateús	Novo Oriente	107,60
Jaburu II	Sertões de Crateús	Independência	75,31

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados de ensaios de caracterização realizados nas amostras coletadas nas regiões de coroamento e talude de jusante das barragens analisadas, forneceram os parâmetros de consistência necessários à avaliação proposta. A Tabela 3 apresenta os valores médios do Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP), Índice de Plasticidade (IP), Índice de Consistência (IC), teor de umidade natural (Wnat) e margem de segurança até o Limite de Liquidez (Δw) para cada estrutura analisada.

Tabela 3 – Resultados de Consistência e Umidade das Barragens Analisadas

Barragem	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IC	W_{nat} (%)	Δw (%)
Aracoiaba	39	21	18	1,64	9,52	28,98
Arneiroz II	29	16	13	1,87	7,30	21,70
Barra Velha	34	19	15	1,59	9,83	23,79
Faé	32	19	13	1,56	12,05	19,78
Flor do Campo	30	17	13	1,41	7,88	21,92
Gangorra	34	22	12	1,99	12,69	21,02
Gavião	37	23	14	1,69	13,63	22,87
Itapajé	37	20	17	1,49	11,61	24,89
Jaburu I	28	20	8	1,69	13,92	13,65
Jaburu II	35	19	16	1,81	10,47	24,13
Jatobá II	33	19	14	1,73	8,81	24,39
Jenipapo	51	35	16	2,40	12,56	38,20
Missi	32	20	12	1,99	8,77	22,73
Olho d'Água	36	21	15	1,46	13,67	22,53
Pesqueiro	37	24	13	1,91	12,77	24,23
Riacho da Serra	28	18	10	2,81	2,82	25,19
Sítios Novos	44	23	21	1,30	16,66	27,09
Sousa	34	18	16	1,36	12,03	22,17
Umari	30	18	11	2,01	7,14	22,53

A amplitude observada nos resultados de Limite de Liquidez (28% a 51%) e Índice de Plasticidade (8% a 21%) evidencia uma significativa diversidade na natureza dos materiais que compõem os maciços das barragens estudadas. Essa variabilidade é intrínseca à formação mineralógica dos materiais extraídos das jazidas utilizadas na construção de cada estrutura, refletindo diferentes composições mineralógicas e frações granulométricas da fração fina. Solos com índice de plasticidade e Limite de Liquidez maiores indicam presença de minerais argilosos mais ativos ou com maior porcentagem de argila em sua composição. A análise da plasticidade dos materiais analisados foi realizada a partir da classificação de Jenkins, os solos das barragens analisadas classificam-se entre as categorias de média plasticidade ($7 < IP \leq 15$) e alta plasticidade ($IP > 15$). Observa-se que 13 barragens possuem materiais de média plasticidade enquanto as restantes (6 barragens) são compostas por solos de alta plasticidade. Solos de média plasticidade apresentam melhor trabalhabilidade e menor variação volumétrica, enquanto os de alta plasticidade apresentam maior potencial de expansão e retração, fator que indica maior suscetibilidade desses maciços à fissuração por ressecamento, principalmente no contexto de variações climáticas comuns em regiões como o semiárido nordestino.

Em relação à consistência atual dos solos analisados, todas as barragens apresentam $IC>1$, com valores variando entre 1,30 e 2,81. Tal cenário evidencia que os maciços compactados se encontram predominantemente nos estados sólido ou semissólido, condição frequente em regiões semiáridas submetidas a regimes prolongados de estiagem. Do ponto de vista da resistência ao cisalhamento, esse resultado é, em princípio, favorável: solos posicionados nos estados sólido e semissólido, com umidade afastada do LL, tendem a apresentar maior resistência não drenada quando comparados a solos próximos ao estado líquido, conforme demonstrado por [12], que constataram redução progressiva da resistência não drenada à medida que o teor de umidade natural se aproxima do Limite de Liquidez, e por [15], que associaram valores decrescentes de IC a reduções sistemáticas da resistência ao cisalhamento em solos remoldados posicionados entre os limites de consistência.

Embora esse estado confira maior rigidez mecânica imediata aos materiais, a manutenção de umidades abaixo do Limite de Plasticidade (LP) indica que os maciços são submetidos a ciclos constantes de dessecação favorecendo a retração do material e a consequente formação de trincas nos maciços. Um estudo realizado por [16] em solos de caráter retrátil do sul do Brasil observou que solos com IC muito elevado e submetidos a elevadas sucções matriciais apresentam compressibilidade reduzida, mas vulnerabilidade estrutural relacionada à fissuração. Esse comportamento é especialmente relevante para os materiais compactados em barragens, onde a continuidade estrutural do maciço é condição essencial para o funcionamento seguro da obra, uma vez que fissuras de retração podem evoluir para caminhos preferenciais de percolação e constituir o estágio inicial de mecanismos de erosão interna (*piping*), mesmo em estruturas cuja resistência ao cisalhamento aparente permaneça elevada.

A barragem Riacho da Serra, que apresentou o maior IC do conjunto (2,81) associado ao menor teor de umidade natural (2,82%), ilustra um estado de dessecação particularmente acentuado. Sua principal implicação prática não está relacionada ao risco de perda de resistência por saturação, dado que a margem Δw dessa estrutura (25,19%) encontra-se próximo da tendência central observada para o conjunto de

barragens analisadas e dentro da faixa de variação típica dos dados, mas sim ao potencial de abertura e propagação de trincas de retração, que deve ser objeto de atenção específica nas inspeções visuais de rotina, sobretudo no coroamento e nas proximidades de estruturas de concreto embutidas no maciço, onde a concentração de tensões tende a favorecer a fissuração.

Além das considerações acerca da plasticidade e do índice de consistência, a margem entre o teor de umidade natural e o Limite de Liquidez ($\Delta w=LL-w_{nat}$) foi adotada neste trabalho como indicador de margem de segurança em relação ao estado de consistência fluida, condição crítica associada à baixa resistência ao cisalhamento dos solos argilosos, conforme demonstrado pelos estudos de [12] e [15].

Os valores obtidos para a margem de segurança variaram entre 13,65% e 38,20%, estes resultados indicam que nenhum dos maciços analisados apresenta risco imediato de atingir o estado de consistência fluida por elevação do teor de umidade natural ao nível do LL. É fundamental salientar, contudo, que tal diagnóstico constitui um indicativo pontual do estado das estruturas, possuindo um caráter dinâmico e estando sujeito a reduções significativas durante períodos de chuva intensa ou eventos de recarga do reservatório, sobretudo nas regiões de coroamento e talude de jusante, mais suscetíveis à infiltração direta de água de chuva do que às variações do nível do reservatório propriamente dito.

A Barragem Jaburu I merece destaque especial por apresentar a menor margem do conjunto (13,65%), combinada ao menor IP do grupo (8%), o que implica uma faixa plástica estreita e transição mais rápida entre os estados de consistência. A maior vulnerabilidade de solos com baixo IP é explicada por [17], que demonstraram que solos de baixo LL apresentam uma taxa de redução da resistência não drenada mais acentuada sob umedecimento do que solos de alta plasticidade. Em razão do baixo IP, a transição de um estado resistente para um estado de fluidez ocorre de forma mais rápida e abrupta, o que se aplicado em regiões com variações climáticas consideráveis torna a estrutura mais sensível a esses fenômenos.

O contraste entre Riacho da Serra (IC mais elevado do conjunto) e Jaburu I (Δw mais baixo) evidencia que os dois índices capturam dimensões distintas de vulnerabilidade: enquanto o IC sinaliza, de forma isolada, o grau de dessecação atual do material direcionando atenção para o risco de fissuração, o Δw sinaliza a proximidade absoluta em relação ao estado de mínima resistência ao cisalhamento, direcionando atenção para o risco de perda de resistência por saturação. Tal resultado reforça a utilização conjunta desses indicadores como ferramenta de apoio à priorização de inspeções e investigações complementares.

A interpretação dos resultados apresentados deve considerar um conjunto de limitações inerentes à metodologia empregada, as quais condicionam o alcance das conclusões e devem orientar sua aplicação prática.

Os valores de IC e Δw apresentados na Tabela 3 correspondem a médias aritméticas de resultados obtidos em número variável de amostras por barragem, coletadas exclusivamente nas regiões de coroamento e talude de jusante. Esse procedimento, embora justificado pela viabilidade operacional de amostragem em estruturas em operação, não contempla a variabilidade espacial tridimensional dos materiais no interior do maciço, tampouco as condições de umidade no núcleo argiloso ou nas

proximidades da linha freática, regiões potencialmente mais críticas do ponto de vista da estabilidade. O uso de valores médios pode, assim, não reproduzir totalmente as heterogeneidades do maciço, existindo locais e pontos de menor margem de segurança não capturados pela amostragem realizada.

Os dados de teor de umidade natural refletem exclusivamente as condições existentes no momento da coleta das amostras, constituindo um retrato pontual, e não necessariamente representativo do estado mais crítico já experimentado pelas estruturas ao longo de sua vida útil, tampouco das condições que poderão ocorrer futuramente em eventos de precipitação extrema ou de estiagem prolongada. A ausência de uma série histórica de monitoramento da umidade nos pontos amostrados impede a avaliação da tendência evolutiva do IC e do Δw ao longo do tempo.

Reforça-se que o IC e o Δw são índices derivados de ensaios de caracterização (limites de Atterberg e teor de umidade natural), portanto grandezas classificatórias, e não parâmetros de resistência ou de estabilidade propriamente ditos. Embora a literatura geotécnica indique correlações consistentes entre a posição da umidade em relação aos limites de consistência e a resistência não drenada dos solos, tais relações são de natureza empírica, dependentes do tipo de solo, e não devem ser extrapoladas de forma direta para a obtenção de fatores de segurança, tampouco substituir ensaios de resistência (cisalhamento direto e triaxial) e análises de estabilidade de taludes, indispensáveis para a verificação quantitativa da segurança estrutural das barragens. Além disso, a comparação direta entre os índices obtidos para diferentes barragens deve ser conduzida com cautela, uma vez que as estruturas analisadas foram construídas em diferentes épocas, com materiais de jazidas distintas e, possivelmente, sob diferentes graus de controle de compactação, fatores não avaliados neste estudo e que podem influenciar de forma relevante o comportamento mecânico dos maciços, ainda que apresentem índices de consistência semelhantes.

Do ponto de vista da priorização de recursos, a comparação entre as 19 estruturas analisadas permite identificar quais barragens apresentam materiais mais próximos do estado crítico de consistência fluida (menores valores de Δw) ou indícios de dessecação mais acentuada (maiores valores de IC), sugerindo que a análise conjunta de IC e Δw pode contribuir para a priorização de recursos técnicos e financeiros destinados às investigações complementares mais aprofundadas, diferenciando estruturas com perfis distintos de vulnerabilidade.

Sob a ótica do monitoramento e da inspeção, os índices propostos podem ser incorporados como norteadores nas rotinas periódicas de acompanhamento, funcionando como indicadores de alerta, diferenciando barragens com perfis de vulnerabilidade distintos. Estruturas com IC elevado demandam atenção voltada à identificação e ao monitoramento de trincas de retração no coroamento e nos taludes. Por outro lado, estruturas com Δw reduzido demandam atenção voltada à resposta do maciço frente a eventos de umedecimento rápido, como chuvas intensas ou elevações abruptas do nível do reservatório.

6. CONCLUSÕES

A análise dos parâmetros de consistência dos materiais das 19 barragens estudadas demonstrou que todas as estruturas apresentam Índice de Consistência (IC) superior

a 1,0, indicando materiais predominantemente nos estados semissólido ou sólido, associados a maiores níveis de resistência ao cisalhamento. Além disso, as margens entre o teor de umidade natural e o Limite de Liquidez mostraram-se satisfatórias em todas as estruturas, não indicando, para as condições avaliadas e considerando as limitações do estudo, indícios de risco imediato de perda de resistência por saturação.

Os resultados observados são coerentes com o comportamento esperado para estruturas localizadas no semiárido cearense, onde os longos períodos de estiagem favorecem o ressecamento dos maciços e, consequentemente, a elevação dos valores de IC. A comparação conjunta entre IC e Δw, contudo, revelou que essas grandezas captam dimensões distintas e complementares de vulnerabilidade: estruturas como Riacho da Serra, com IC extremamente elevado, indicam risco predominantemente associado ao ressecamento acentuado do material; já estruturas como Jaburu I, com Δw claramente reduzido em relação ao restante do conjunto, indicam risco predominantemente associado à proximidade do estado de consistência fluida sob eventuais elevações de umidade. Essa distinção reforça que a leitura isolada de qualquer um dos dois índices pode subestimar riscos de natureza diferente, sendo recomendável sua interpretação conjunta.

Embora esse comportamento represente maior afastamento do estado crítico de liquidez, o ressecamento excessivo pode favorecer processos de retração e fissuração dos solos. Uma vez formadas, essas fissuras constituem caminhos preferenciais de percolação concentrada quando submetidas a eventos de precipitação intensa ou de saturação, podendo contribuir para a evolução de processos de erosão interna (*piping*) ao longo das descontinuidades e/ou para a redução localizada da resistência ao cisalhamento nas superfícies expostas, configurando um mecanismo potencial associado ao modo de falha por instabilidade, distinto daquele associado à perda de resistência por saturação uniforme do maciço. Esse potencial de modo de falha é particularmente relevante por não ser diretamente identificado pelo IC isoladamente, uma vez que valores elevados desse índice tendem a ser interpretados apenas como indicativo de maior rigidez mecânica, quando, na realidade, também sinalizam maior propensão ao ressecamento e à fissuração.

Dessa forma, conclui-se que o Índice de Consistência e a margem de segurança em relação ao Limite de Liquidez (Δw) constituem indicadores complementares capazes de auxiliar a avaliação preliminar das condições geotécnicas e da segurança de barragens de terra em regiões semiáridas. Esses parâmetros podem ser incorporados como indiadores norteadores e complementares nas rotinas de inspeção, subsidiando a priorização de inspeções e investigações adicionais, contribuindo para a identificação de estruturas mais suscetíveis a processos de degradação associados às variações de umidade, tanto por fissuração decorrente de retração, quanto por perda de resistência devido à saturação.

7. PALAVRAS-CHAVE

Barragens de Terra, Limites de Atterberg, Índices de Consistência, Ensaios geotécnicos, modos de falha.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BRASIL. (2010) – “Lei nº 12.334: Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)”, Diário Oficial da União, Brasília.

[2] BRASIL. (2020) – “Lei nº 14.066: Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, e a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997”, Diário Oficial da União, Brasília.

[3] PINTO, C. S. (2006) – “Curso Básico de Mecânica dos Solos”, Oficina de Textos, São Paulo.

[4] CAPUTO, H. P. (1988) – “Mecânica dos Solos e suas Aplicações”, LTC, Rio de Janeiro.

[5] DAS, B. M. (2007) – “Fundamentos de Engenharia Geotécnica”, Thomson, São Paulo.

[6] ABNT (2025) – “NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[7] ABNT (2025) – “NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[8] MASSAD, F. (2010) – “Obras de Terra: curso básico de Geotecnia”, Oficina de Textos, São Paulo.

[9] SKEMPTON, A. W. (1953) – “The Colloidal Activity of Clays”, Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Zurique.

[10] SANDRONI, S. S. e GUIDICINI, G. (2022) – “Barragens de terra e enrocamento”, São Paulo.

[11] NAGARAJ, H. B., SRAVAN, M. V. e DEEPA, B. S. (2018). – “Factors influencing undrained strength of fine-grained soils at high water contents”. Geomechanics and Geoengineering, p. 276–287.

[12] SHARMA, B. e BORA, P. K. (2003) – “Plastic limit, liquid limit and undrained shear strength of soil – Reappraisal”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, USA.

[13] ICOLD (2005) – “Risk Assessment in Dam Safety Management”, International Commission on Large Dams, Bulletin 130, Paris.

[14] DUNCAN, J. M. et al. (2014) – “Soil Strength and Slope Stability”, John Wiley & Sons, New Jersey.

[15] KAYABALI, K. e TUFENKCI, O. O. (2010) – "Shear strength of remolded soils at consistency limits", Canadian Geotechnical Journal.

[16] NOVAES, M. H. S. (2023) – “Comportamento físico-mecânico de solos com caráter retrátil do Sul do Brasil”. Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages.

[17] DAS, N., SARNA, B., SINGH, S. e SUTRADHAR, B. B. (2013) – “Comparison in undrained shear strength between low and high liquid limit soils”, International Journal of Engineering Research & Technology.

	**Lívia Maria de Sousa POMPEU** Possui graduação em Engenharia Civil pelo Instituto Federal do Ceará. Mestranda em Engenharia Civil na área de concentração em Geotecnia pela Universidade Federal do Ceará. Atualmente é colaboradora na área de Segurança de Barragens na Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – Cogerh.

	**Itamara Mary Leite de Menezes TAVEIRA** Engenheira Civil e mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande e doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará na área de Recursos Hídricos. Atualmente é gerente de Segurança e Infraestrutura Hídrica da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. Conselheira Fiscal do Comitê Brasileiro de Barragens e Vice-Diretora Regional do CBDB/CE.
	**Marilia Nunes de QUEIRÓS** Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade de Fortaleza. Técnica em Edificações pelo Instituto Federal do Ceará. Atualmente é colaboradora na área de Segurança de Barragens na Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – Cogerh.
	**Taigo Correia PINHO** Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade de Fortaleza. Pós-Graduando em Segurança de Barragens no IDD. Atualmente é colaborador na área de Segurança de Barragens na Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – Cogerh.
	**Rafael Mota de OLIVEIRA** Geólogo pelo Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, Mestre e Doutor em Geologia (Geologia Ambiental e Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará - UFC. Pesquisador Associado do Laboratório de Hidrogeologia LABHI/DEGEO/CC/UFC e consultor em Hidrogeologia. Atualmente é colaborador na área de Segurança de Barragens na Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

ANÁLISE DE RISCO ELABORADA PARA EROSÕES IDENTIFICADAS EM PÁTIO DE HOMOGENEIZAÇÃO

Marcus BARBOSA
Engenheiro Civil - G5 Engenharia

Isabela SILVA
Msc. Eng. Civil Geotécnica - G5 Engenharia

Joaquim DUARTE
Diretor Técnico de Engenharia Civil - G5 Engenharia

RESUMO

O artigo apresenta uma análise de risco desenvolvida para o mapeamento dos impactos decorrentes de erosões observadas em um pátio de homogeneização. Foi avaliada a hipótese mais verossímil para a origem dessas ocorrências e, a partir disso, foram definidas as probabilidades e consequências associadas aos eventos focais analisados, resultando na elaboração de uma matriz de risco. Adicionalmente, foram propostas ações emergenciais para subsidiar a tomada de decisão da equipe operacional da mina onde o pátio está inserido.

ABSTRACT

This paper presents a risk analysis developed to map the impacts associated with erosive processes identified in a homogenization stockyard. The most plausible hypothesis for the origin of these occurrences was evaluated and based on this assessment the probabilities and consequences associated with the analyzed focal events were defined, resulting in the development of a risk matrix. In addition, emergency actions were proposed to support the decision-making process of the operational team responsible for the mining site where the stockyard is located.

1. INTRODUÇÃO

O pátio de homogeneização pertencente a uma mina de beneficiamento de minério de ferro foi acometido por processos erosivos que afeta as atividades operacionais do empreendimento. O pátio é integrado por duas correias transportadoras, sendo uma subterrânea (denominada correia A) e outra em nível superior (designada correia B), porém ainda abaixo da cota do aterro do pátio. Na região de estudo foi identificada uma ruptura interna no revestimento do sistema de drenagem associada à correia subterrânea, um processo erosivo superficial adjacente à correia superior e escavações irregulares de canais de drenagem não projetados em conjunto com o sistema subsuperficial de drenagem existente no referido pátio, podendo tais fatores estarem associados entre si e gerando as intercorrências observadas.

Como parte do projeto de recuperação da área, foi desenvolvida uma análise de risco, objeto deste estudo, tendo como referência a ABNT NBR ISO/IEC 31010:2021 [1] (em consonância com as diretrizes gerais de gestão de riscos estabelecidos pela ISO 31000:2018 [2]), que orienta a elaboração de matrizes de probabilidade e consequência associadas a eventos focais. A matriz elaborada teve como objetivo subsidiar a definição de ações a serem adotadas pela equipe operacional da mina, de acordo com a magnitude dos riscos identificados.

2. HIPÓTESE DA CAUSA DA EROSÃO

No estudo técnico diagnóstico do projeto, foram formuladas duas hipóteses acerca da justificativa dos processos erosivos averiguados, considerando as ocorrências relatadas, visitas de campo realizadas pela equipe, documentos e fotos disponibilizadas para o estudo. De forma a possibilitar o desenvolvimento do trabalho, foi selecionada a opção de maior probabilidade de ocorrência considerando os dados existentes e elaborada a matriz de risco com base nos pontos levantados por esse cenário.

A hipótese pressupõe que uma ruptura do revestimento do tubo de drenagem foi o gatilho que desencadeou a formação de vazios no maciço do entorno dessa região, que, juntamente à uma tentativa ineficaz de preenchimento da cavidade com concreto, fomentou condições de instabilidade no terreno e provocou a subsidência no aterro adjacente à correia B.

O aumento da saturação do maciço durante períodos chuvosos em conjunto com as deficiências do sistema de drenagem superficial do Pátio de Homogeneização, a escavação e operação de *sumps* não previstos em projeto e a ausência de um sistema de drenagem profunda são elencados como os principais agravantes que possivelmente culminaram no surgimento de outras cavidades situadas entre o sistema de drenagem e área afetada pela subsidência em superfície.

3. MATRIZ PROBABILIDADE X CONSEQUÊNCIA

Segundo [1] e [2], a matriz de probabilidade/consequência é utilizada para avaliar e classificar a magnitude relativa dos riscos com base em um par probabilidade e consequência, que tipicamente está associado a um evento focal.

Esta norma permite uma classificação rápida dos riscos em diferentes níveis de significância; além de proporcionar uma apresentação visual clara da significância pertinente do risco por consequência, probabilidade ou nível de risco. Ainda, pode ser utilizada para comparar riscos com diferentes tipos de consequências. As limitações estão relacionadas ao grau de informações existentes e a quão detalhada são as classificações, podendo introduzir subjetividade na interpretação e comparação dos riscos avaliados [3].

Escalas personalizadas para consequência e probabilidade são definidas para os eixos da matriz e podem ter qualquer número de pontos, sendo mais comuns as escalas de três, quatro ou cinco pontos, as quais podem ser qualitativas, semiquantitativas ou quantitativas.

Para este trabalho, estabeleceram-se três níveis de probabilidade e três de consequência, com a definição da escala tendo sido adaptada às características do empreendimento, conforme recomendado em processos de gerenciamento de risco que permitem a customização da ferramenta de acordo com as necessidades de cada projeto [2] [4].

A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam a definição da escala de probabilidade e de consequência, respectivamente, sendo especificada para o objeto de estudo do artigo.

Tabela 1 – Definição da escala de probabilidade

Classificação da Probabilidade	**Nível**	**Descrição**
P1	Pouco Provável	Não há evidência de evolução recente da erosão;
		Não há gatilho ativo (sem fluxo d'água/surgência; chuvas não alteram o quadro);
		Condição controlada por medidas existentes (proteção superficial/drenagem operacional);
P2	Provável	Há vestígios iniciais/intervalados de evolução da erosão (pequenos desplacamentos, sulcos, carreamento pontual);
		Pode evoluir com gatilhos simples (chuva moderada/intensa, aumento de vazão do *sump*, vibração/tráfego de equipamentos);
		Existem controles, mas são parciais/insuficientes (drenagem subdimensionada, proteção degradada);
P3	Muito Provável	Evolução ativa ou recente confirmada (crescimento retrogressivo, abertura de trinca/borda, carreamento contínuo);

Classificação da Probabilidade	Nível	Descrição
		Gatilho presente e recorrente (atuação contínua da água, surgência, falha da drenagem);
		Sem contenção eficaz ou situação degrada sem intervenção.

Tabela 2 – Definição da escala de consequência

Classificação da Consequência	Nível	Impacto	Descrição
C1	Baixa	Operação	Sem impacto operacional significativo, restrito e de fácil correção.
		Segurança de Pessoas e Equipamentos	Sem risco à integridade física de pessoas e sem danos a equipamentos.
		Ambiental	Sem impacto às interferências, com integridade preservada
C2	Média	Operação	Interrupção parcial ou temporária, com necessidade de correção.
		Segurança de Pessoas e Equipamentos	Risco moderado, com a possibilidade de lesões leves ou incidentes sem afastamento, além da possibilidade de danos a equipamentos.
		Ambiental	Dano localizado, passível de recuperação.
C3	Alta	Operação	Interrupção total das atividades, com impacto significativo.
		Segurança de Pessoas e Equipamentos	Risco elevado, com possibilidade de acidentes graves ou fatais e danos severos a equipamentos
		Ambiental	Dano severo ou ruptura, com necessidade de substituição.

A matriz é estruturada com consequência em um eixo e probabilidade no outro, correspondendo às escalas definidas. Na Tabela 3 foram definidos três níveis de prioridade, categorizados por meio de um esquema de cores, para representar a magnitude do risco dos processos erosivos.

Tabela 3 – Definição da escala de consequência

Probabilidade	**P1**	Baixo	Médio	Alto
	P2	Médio	Médio	Alto
	P3	Alto	Alto	Alto
		C1	**C2**	**C3**
		Consequência		

A Tabela 4 exibe os possíveis eventos focais (também denominados como impactos) que foram identificados neste trabalho considerando os riscos gerados à operação, segurança e meio ambiente que podem ocorrer e a serem classificados na matriz de risco.

Tabela 4 – Identificação dos possíveis impactos

Item	Possíveis Eventos Focais
1	Agravamento da erosão com comprometimento da capacidade operacional de equipamentos e instalações.
2	Agravamento da erosão com comprometimento do tráfego e operação no Pátio de Homogeneização.
3	Agravamento da erosão com possibilidade de novas paradas não programadas devido à degradação do piso e obstrução recorrente do sistema de drenagem.
4	Agravamento do processo erosivo, associado ao tamponamento e possível colapso do tubo, comprometendo a drenagem da água na região por período prolongado e ocasionando o alagamento da porção inferior da galeria da Correia B, com consequentes danos aos equipamentos existentes.
5	Condições inseguras durante períodos chuvosos, com alagamentos e instabilidade superficial do solo.
6	Possível contaminação de corpos receptores devido ao aumento de sólidos em suspensão.
7	Agravamento da erosão com aumento dos vazios sem que haja evidências na superfície e gere rebaixamento súbito do terreno.

De posse das Tabelas 1 a 4, a classificação dos pontos focais identificados no estudo com base em sua probabilidade de ocorrência e consequência são mostrados na matriz de risco visualizada na Tabela 5. Nota-se que nenhum evento focal foi enquadrado como “baixa probabilidade de ocorrência”, bem como não houve classificações como “muito provável”. Com relação às consequências, os impactos elencados foram classificados com baixa, média e alta de acordo com sua consequência em caso de ocorrência. Compreende-se que a possibilidade de concretização desses eventos é ampliada em função da evolução do processo erosivo, provocada pelas alterações nos índices pluviométricos e pela insuficiência da drenagem e da proteção superficial da região.

Tabela 5 – Matriz de classificação de magnitude do risco

Probabilidade	**P1**	-	-	-
	P2	6	1 / 3	2 / 4 / 5 / 7
	P3	-	-	-
		C1	**C2**	**C3**
		Consequência		

Após a classificação dos eventos focais em função de sua probabilidade e consequência, torna-se possível estabelecer ações compatíveis com a magnitude do risco resultante. A norma [1] define que tais ações podem ser vinculadas à classificação obtida na matriz de risco, dependendo das escalas adotadas e da tolerância do empreendedor ao risco. Desse modo, as ações foram determinadas considerando a magnitude do risco associada a cada evento, buscando minimizar impactos na operação da usina. Com isso, a Tabela 6 apresenta as ações correspondentes a cada magnitude de risco avaliada.

Tabela 6 – Ações de acordo com magnitude de risco

Magnitude de risco	**Ações a serem tomadas**
Baixo	Sem necessidade de intervenção;
	Iniciar controle através de inspeção visual quinzenal com registro fotográfico;
Médio	Iniciar monitoramento dos deslocamentos e nível d'água;
	Avaliar tendência de estabilização ou crescimento dos movimentos / nível d'água;
	Realizar inspeção visual (semanal) com registro fotográfico;
Alto	Isolar a área;
	Intensificar monitoramento dos deslocamentos e nível d'água;
	Iniciar execução do projeto de recuperação da área da erosão superficial;
	Realizar semanalmente inspeção visual com registro fotográfico;

4. CONCLUSÕES

A partir da identificação dos processos erosivos no pátio de homogeneização, a análise de risco identificou e classificou os impactos associados aos âmbitos operacional, ambiental e de segurança. A avaliação das hipóteses causais permitiu definir os eventos focais e quantificar suas probabilidades e consequências, fundamentando a estruturação da matriz de risco deste estudo. Os resultados obtidos permitiram subsidiar a definição de ações emergenciais e diretrizes para recuperação

da área, com foco na mitigação do avanço dos processos erosivos, na redução da probabilidade de recorrência e na manutenção da segurança operacional das estruturas existentes. Dessa forma, compreende-se que a metodologia aplicada se mostrou adequada como ferramenta de apoio à tomada de decisão em situações envolvendo manifestações erosivas e riscos associados à infraestrutura operacional.

5. PALAVRAS-CHAVE

Análise de Risco, Matriz de probabilidade/consequência, Erosão, Pátio de Homogeneização, Mineração.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a G5 Engenharia pela oportunidade da atuação neste projeto e desenvolvimento deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2021) - “Gestão de riscos – Técnicas para o processo de avaliação de riscos”, NBR ISO/IEC 31010, Rio de Janeiro.

[2] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO (2018) - “Risk management – Guidelines”, ISO 31000, Geneva.

[3] COX, L. A. (2008) - “What’s Wrong with Risk Matrices?”, Risk Analysis, v. 28, n. 2, p. 497–512.

[4] PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE – PMI (2021) - “A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)”, 7th Edition, Newtown Square.



Marcus Vinicius Teixeira BARBOSA

Engenheiro Civil formado pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), com experiência em laboratório de solos, atuando em ensaios triaxiais e de cisalhamento direto, além de projetos de descaracterização de barragens e documentação técnica para a legislação minerária. Atualmente desenvolve projetos geotécnicos, barragens, contenções e usinas hidrelétricas na G5 Engenharia.

	**Isabela Grossi da SILVA** Engenheira Civil formada pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), onde também obteve título de Mestre em Geotecnia. Possui Pós-graduação em Geotecnia e Segurança de Barragens e Pilhas pelo Instituto Minere. Detém experiência em projeto, instalação e automação de instrumentos e, atualmente, atua no desenvolvimento de projetos de barragens, diques, contenção e demais estruturas geotécnicas na G5 Engenharia.
	**Joaquim Monteiro Garcez DUARTE** Engenheiro Civil formado pela Universidade Federal do Paraná com mestrado em Geotecnia pela Universidade de São Paulo (USP) e especialista em Obras Subterrâneas pela Escola Politécnica de Zurique (Suíça). Possui expertise em Engenharia Geotécnica, com ênfase na área de Obras Subterrâneas, em projetos de infraestrutura no Brasil e no exterior. Atualmente exerce a função de Diretor Técnico de Engenharia Civil da G5 Engenharia.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

Aplicação de Metodologias de Risco em Barragens de Rejeitos: Desafios Práticos e Lições Aprendidas

Adrián MORALES TORRES
Engenheiro Civil - iPresas

Ignacio ESCUDER BUENO
Engenheiro Civil - iPresas

Marco SILVA
Engenheiro Civil - iPresas

Francisco GARCÍA BROOK
Engenheiro Civi - iPresas

RESUMO

À medida que a tomada de decisão informada pelo risco se torna central na gestão de instalações de armazenamento de rejeitos (TSF), a análise de risco semi-quantitativa (SQRA) tem sido amplamente utilizada para apoiar a priorização e o planeamento. Embora forneça um enquadramento estruturado para a identificação e hierarquização de modos potenciais de falha, a sua aplicação em contextos operacionais levanta desafios práticos nem sempre abordados na orientação técnica existente.

Este artigo baseia-se na experiência de campo adquirida em mais de 40 avaliações de risco de TSF em diferentes contextos geográficos e operacionais. São discutidos desafios recorrentes, como o alinhamento de equipas multidisciplinares, a gestão de lacunas e incertezas nos dados, a adaptação a diferentes níveis de maturidade das instalações e a necessidade de garantir resultados credíveis e acionáveis.

Uma conclusão central é que o valor da SQRA depende não só da condução do processo, mas também da utilização dos seus resultados. As dificuldades surgem frequentemente na tradução das conclusões em ações concretas de redução do risco, sobretudo em instalações complexas. Nestes casos, a SQRA atua como ferramenta de triagem, identificando áreas que requerem análises mais detalhadas.

O artigo aborda ainda quando a progressão para uma análise quantitativa de risco (QRA) é apropriada e destaca a importância de comunicar claramente as potencialidades e limitações de cada abordagem.

ABSTRACT

As risk-informed decision-making becomes increasingly central to the management of tailings storage facilities (TSFs), semi-quantitative risk assessment (SQRA) has been widely used to support prioritization and planning. Although it provides a structured framework for identifying and ranking potential failure modes, its application in operational contexts often presents practical challenges that are not fully addressed in existing technical guidance.

This paper is based on field experience gained from more than 40 TSF risk assessments conducted across different geographical and operational contexts. It discusses recurring challenges such as aligning multidisciplinary teams, managing data gaps and uncertainties, adapting the process to varying levels of facility maturity, and ensuring that results are credible and actionable.

A key conclusion is that the value of SQRA depends not only on how the process is conducted, but also on how its results are used. Difficulties often arise when translating workshop outcomes into concrete risk reduction actions, particularly in complex facilities. In such cases, SQRA serves as a screening tool, identifying areas that require more detailed analysis.

The paper also explores when progression to a quantitative risk assessment (QRA) is appropriate and highlights the importance of clearly communicating the strengths and limitations of each approach.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a gestão da segurança de barragens de rejeitos tem passado por uma evolução significativa, impulsionada pela necessidade de melhorar a tomada de decisão em contextos de crescente complexidade técnica, operacional e regulatória. Eventos recentes e o desenvolvimento de normas internacionais, como o Padrão Global de Gestão de Rejeitos para a Indústria de Mineração (GISTM), evidenciaram a importância de adotar abordagens mais integradas, que considerem não apenas o projeto da infraestrutura, mas também o seu comportamento ao longo do tempo.

Nesse contexto, um dos principais desafios é a adequada incorporação da incerteza e da variabilidade do sistema nos processos de decisão. As barragens de rejeitos apresentam características que dificultam sua análise por meio de abordagens tradicionais, devido à sua evolução construtiva, à interação entre disciplinas e à dependência de informações que podem ser incompletas ou mutáveis.

Diante dessas limitações, as abordagens baseadas em risco têm emergido como uma ferramenta eficaz para estruturar a informação disponível, identificar os aspectos mais críticos do sistema e facilitar a priorização de ações. No entanto, na prática, um dos desafios mais relevantes não reside apenas na aplicação de metodologias de análise de riscos, mas na sua integração efetiva aos processos de gestão e tomada de decisão das organizações.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo descrever a aplicação de metodologias de análise de riscos em barragens de rejeitos dentro de uma abordagem orientada à gestão contínua do risco. A partir da experiência prática acumulada, analisa-se como essas metodologias podem contribuir para melhorar a compreensão do sistema, apoiar a priorização de medidas e facilitar processos de decisão mais robustos ao longo do ciclo de vida da instalação.

2. ENFOQUE DE ANÁLISE E GESTÃO CONTÍNUA DO RISCO

O enfoque proposto assenta na aplicação progressiva de metodologias de análise de risco integradas num modelo de gestão contínua do risco, com o objetivo de manter a informação de risco como um elemento ativo de suporte à tomada de decisão ao longo de todo o ciclo de vida das barragens de rejeitos.

A abordagem combina diferentes níveis de análise, ajustados ao contexto de decisão e ao grau de detalhe necessário em cada fase. O processo inicia-se normalmente através de workshops de identificação e classificação de modos de falha (PFMA/SQRA), que permitem identificar os principais mecanismos de risco (“risk drivers”) e estabelecer uma priorização inicial das medidas de redução do risco. A análise pode evoluir para avaliações semi-quantitativas mais detalhadas ou para análises quantitativas do risco, incorporando modelação probabilística, avaliação de consequências e análise de incertezas.

Ao contrário de abordagens baseadas em avaliações pontuais, este esquema é concebido como um processo contínuo e dinâmico, no qual os resultados são revistos e atualizados periodicamente à medida que se obtém nova informação ou ocorrem alterações relevantes na instalação. Desta forma, garante-se a rastreabilidade do risco e reforça-se a ligação entre a análise técnica e a tomada de decisão.

Este enquadramento permite adaptar o nível de profundidade das análises às necessidades específicas de cada situação, otimizando os esforços técnicos e facilitando a priorização de medidas, o planeamento de intervenções e a comparação de alternativas. O esquema geral do enfoque proposto é apresentado na Figura 1.

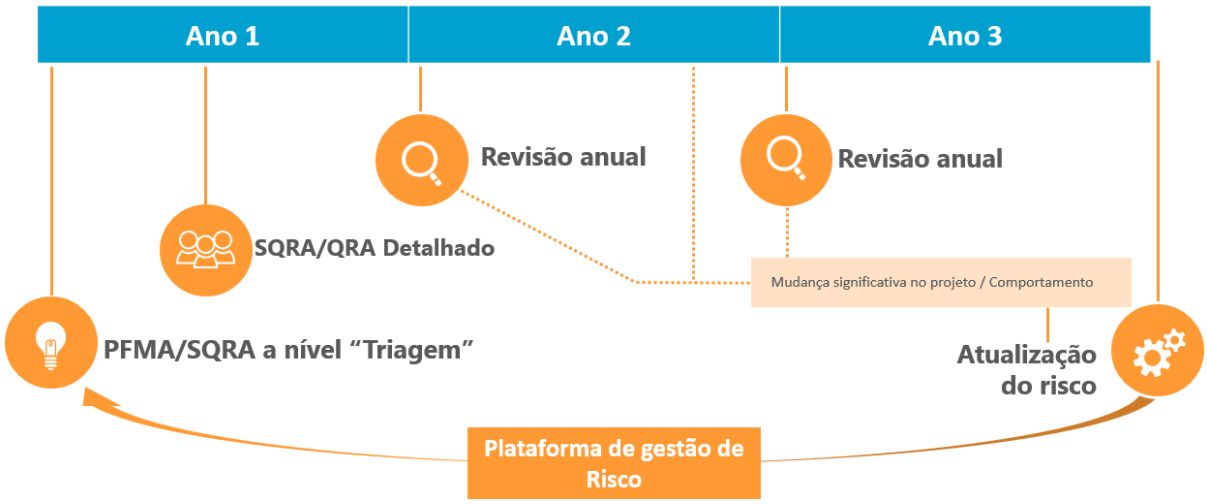


Figura 1 – Esquema conceitual do processo de análise e gestão contínua do risco em barragens de rejeitos.

3. PFMA/SQRA A NIVEL "TRIAGEM"

O primeiro nível de análise constitui a base do enfoque proposto e, em muitos casos, representa a etapa mais relevante dentro do processo de análise de risco. O seu principal objetivo é identificar e priorizar modos de falha credíveis, compreender os principais fatores condicionantes do risco ("risk drivers") da instalação e orientar a definição de medidas de redução do risco, necessidades de estudo e futuras ações de gestão.

Este nível combina workshops de identificação de modos potenciais de falha com uma classificação semiquantitativa do risco, permitindo obter uma primeira caracterização estruturada do risco associado à instalação. Ao contrário de abordagens centradas exclusivamente na verificação de critérios de projeto, este processo promove uma compreensão integrada do comportamento da barragem e das suas principais vulnerabilidades.

3.1 Desenvolvimento dos workshops

Os workshops PFMA/SQRA são normalmente desenvolvidos ao longo de três a quatro dias por instalação, seguindo um processo estruturado que combina revisão documental, visita técnica de campo e sessões de trabalho colaborativo.

O processo inicia-se com a análise da informação disponível e uma visita à barragem, permitindo avaliar o estado atual da instalação e validar as hipóteses preliminares. Posteriormente, os participantes identificam individualmente os potenciais modos de falha (PFM), que são depois discutidos e consolidados em grupo até se alcançar um consenso técnico relativamente aos modos de falha considerados credíveis para a instalação.

Numa fase final, os modos de falha selecionados são classificados de forma semiquantitativa em função da sua probabilidade de ocorrência e das consequências

associadas, sendo também definidas recomendações e possíveis linhas de atuação para redução do risco. O esquema geral do processo seguido durante os workshops é apresentado na Figura 2.

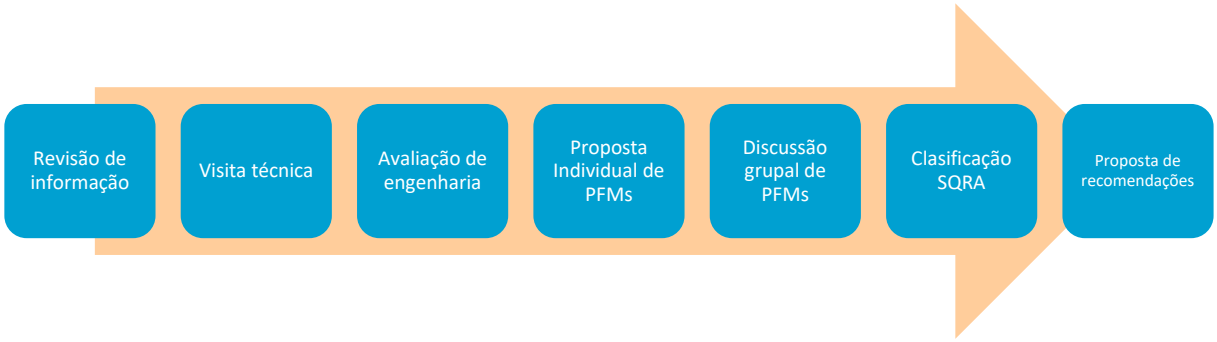


Figura 2 – Processo geral de desenvolvimento de workshops PFMA/SQRA a nível de "screening".

Para garantir a objetividade do processo, recomenda-se que a facilitação dos workshops seja conduzida por uma equipa independente, evitando potenciais conflitos de interesse e promovendo uma discussão equilibrada entre os participantes. A experiência demonstra que a qualidade e utilidade da análise dependem, em grande medida, da seleção adequada de uma equipe verdadeiramente multidisciplinar.



Figura 3– Exemplo de grupo multidisciplinar recomendado em workshops de análise de risco.

A participação da equipe de operação da barragem de rejeitos é particularmente importante, uma vez que aporta conhecimento direto sobre o comportamento real da instalação, as suas condições de operação e os antecedentes relevantes. De igual forma, a participação do Engineer of Record (EoR) e da sua equipa permite incorporar uma compreensão detalhada do projeto, da evolução e do acompanhamento da instalação.

Adicionalmente, a inclusão de especialistas ambientais e sociais contribui para ampliar a compreensão das potenciais consequências e vulnerabilidades associadas aos diferentes modos de falha. A integração destas diferentes perspetivas num enquadramento estruturado de trabalho facilita a construção de uma linguagem comum, melhora a identificação dos modos de falha potenciais e favorece a obtenção de consensos ao longo do processo de análise.

3.2 Classificação e priorização do risco

Após a identificação e seleção dos modos de falha credíveis, estes são classificados através de matrizes semi-quantitativas de probabilidade e consequências, permitindo estabelecer uma primeira caracterização do risco associado à instalação.

Habitualmente, a análise apoia-se em dois tipos complementares de matrizes. A primeira centra-se nas consequências associadas à potencial perda de vidas humanas, constituindo o principal critério de referência em termos de segurança de barragens de rejeitos. Neste caso, os modos de falha são classificados em categorias de risco elevado, médio ou baixo, utilizando critérios de tolerabilidade baseados em recomendações internacionais, como as do USACE, USBR ou ANCOLD.

De forma complementar, são também utilizadas matrizes orientadas para consequências não associadas à perda de vidas, incluindo impactos ambientais, sociais e económicos, aspetos particularmente relevantes neste tipo de infraestruturas. Esta abordagem permite incorporar uma visão mais abrangente do risco e reforçar o processo de tomada de decisão.

As representações gráficas resultantes destas matrizes facilitam a identificação visual dos modos de falha predominantes e permitem estabelecer uma priorização relativa entre eles. Esta priorização constitui posteriormente a base para definir e hierarquizar medidas de redução do risco, estudos adicionais e ações de gestão associadas aos modos de falha identificados.

Um exemplo de classificação semi-quantitativa utilizado neste tipo de análises é apresentado na Figura 4.

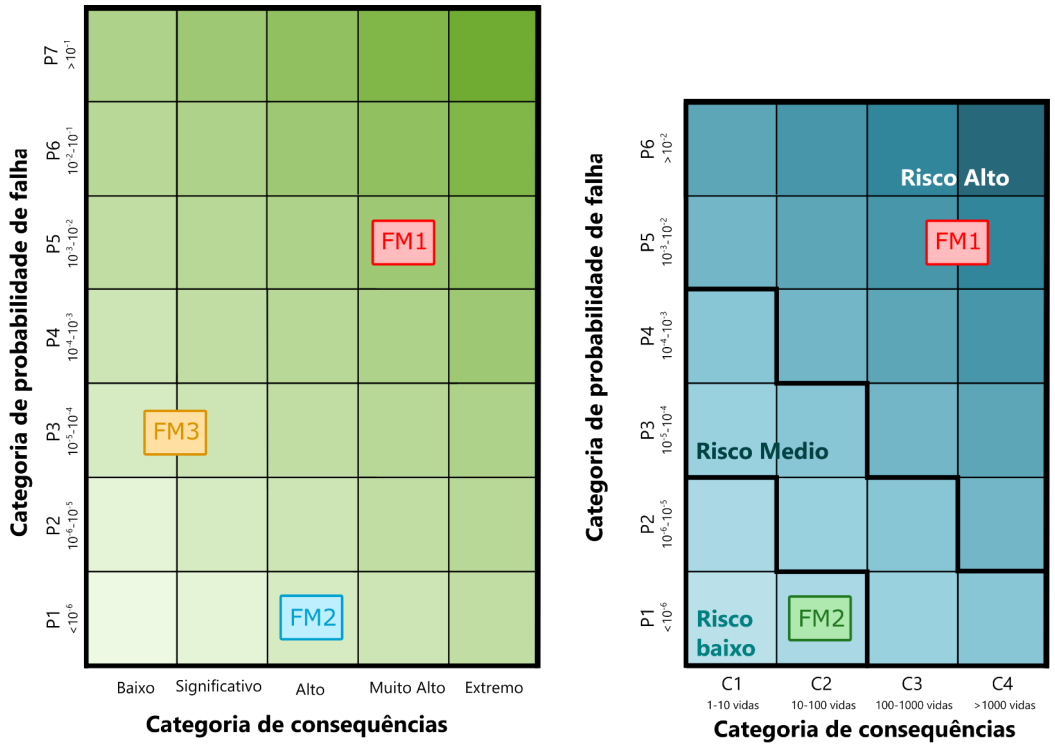


Figura 4 – [Esq.] Exemplo de matriz de classificação de modos de falha sem potencial de perda de vidas; [Dir.] exemplo de matriz de classificação de modos de falha associados a potencial perda de vidas.

3.3 Utilidade prática da análise ao nível de screening (“triagem”)

A experiência obtida em mais de quarenta workshops realizados em barragens de rejeitos demonstra que este nível de análise fornece, em muitos casos, uma base suficientemente robusta para apoiar processos de tomada de decisão.

A análise ao nível de screening permite identificar os principais modos de falha e orientar de forma eficiente a priorização de medidas, o planeamento de estudos e a definição de ações de gestão do risco. Adicionalmente, o processo favorece o alinhamento entre os diferentes intervenientes envolvidos, promovendo uma compreensão partilhada do sistema e das suas principais vulnerabilidades.

4. APROFUNDAMENTO DA ANÁLISE: SQRA DETALHADO E QRA

Como referido anteriormente, em muitos casos as análises PFMA/SQRA ao nível de “screening” fornecem uma base suficiente para apoiar decisões operacionais e processos de gestão do risco. No entanto, determinadas situações exigem um maior nível de detalhe, especialmente quando estão associadas a investimentos relevantes ou quando subsistem elevados níveis de incerteza.

Nestes contextos, a análise pode ser progressivamente aprofundada através de avaliações semi-quantitativas mais detalhadas ou de análises quantitativas do risco (QRA), ajustando o esforço analítico às necessidades específicas do processo de decisão.

4.1 SQRA detalhado e papel dos SMEs

A análise semi-quantitativa detalhada permite aprofundar a avaliação das probabilidades e consequências associadas aos modos de falha previamente

identificados. Este nível de análise é aplicado quando se considera necessário para suportar decisões mais complexas ou reduzir incertezas relevantes.

Uma vez identificados os principais “risk drivers” durante a fase de screening, os modos de falha selecionados são desagregados em diferentes nós, cada um representando uma etapa do desenvolvimento do processo de falha, desde a sua iniciação até ao colapso final. Esta abordagem faseada permite que todos os participantes partilhem uma compreensão comum e detalhada dos aspetos que estão a ser avaliados e da forma como cada etapa contribui para o risco global.

A participação de especialistas (“Subject Matter Experts” – SMEs) assume nesta fase um papel fundamental. Os SMEs contribuem com informação adicional que pode não ter sido totalmente capturada na análise inicial, incluindo detalhes operacionais específicos, condições geotécnicas e hidrológicas particulares ou experiências anteriores relevantes. A sua participação permite tratar de forma mais rigorosa a incerteza inerente ao processo de avaliação, conduzindo a estimativas mais realistas e adequadas ao contexto da instalação.

Este nível de análise possibilita ainda a avaliação detalhada de diferentes cenários, especialmente quando são consideradas novas medidas de redução do risco ou alterações nas infraestruturas existentes. A desagregação dos modos de falha em nós permite obter uma visão mais controlada e detalhada da evolução do processo de falha, facilitando uma análise mais aprofundada do risco.

Adicionalmente, o SQRA detalhado incorpora explicitamente a avaliação da incerteza, fornecendo não apenas a “melhor estimativa” do risco, mas também limites superiores e inferiores associados às bandas de incerteza. Esta abordagem aumenta a robustez das estimativas e melhora o suporte à tomada de decisão, permitindo considerar de forma explícita a variabilidade das condições da barragem e a sua influência nos resultados obtidos.

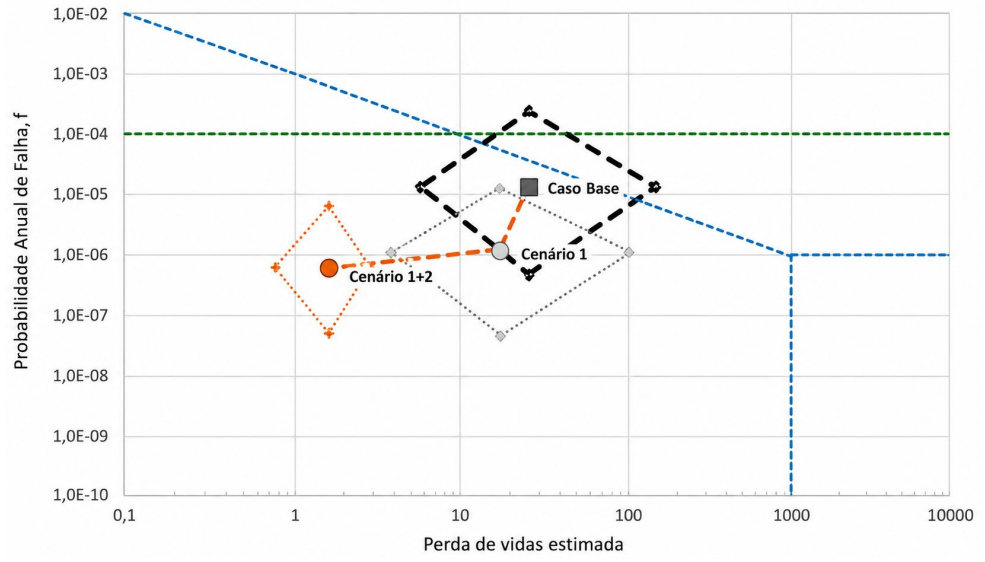


Figura 5 – Exemplo dos resultados de análise SQRA detalhado para caso base e distintos cenários.

4.2 Aplicação do QRA na tomada de decisão

Quando o contexto do projeto assim o justifique, nomeadamente em situações em que o risco seja elevado devido às potenciais consequências ou à maior probabilidade de falha, a avaliação pode ser aprofundada mediante a aplicação de metodologias de análise quantitativa do risco (QRA), incorporando modelação probabilística dos modos de falha, caracterização das ameaças e uma avaliação detalhada das consequências. O QRA permite quantificar o risco em termos absolutos e comparar diferentes cenários e alternativas. No entanto, devido à complexidade do processo, ao tempo necessário para o desenvolvimento das análises e às condições dinâmicas características das barragens de rejeitos, este nível de análise é normalmente reservado para casos específicos, particularmente associados a decisões críticas de investimento, alterações relevantes de projeto ou situações com elevados níveis de incerteza.

Através do QRA, os diferentes componentes do sistema são representados mediante árvores de eventos e diagramas de influência, permitindo modelar explicitamente a interação entre as cargas atuantes, a resposta da barragem e as consequências associadas aos diferentes cenários de falha.

Um dos principais benefícios desta abordagem consiste na possibilidade de avaliar de forma explícita o efeito de diferentes medidas de redução do risco sobre a probabilidade de falha e o risco residual associado. Isto permite comparar alternativas de projeto, medidas operacionais ou intervenções de reabilitação, fornecendo uma base objetiva para apoiar processos de tomada de decisão baseada no risco.

A Figura 6 apresenta um exemplo simplificado de comparação de alternativas através de QRA para um modo de falha por galgamento em diferentes etapas de uma barragem de rejeitos. No cenário base, sem implementação de medidas, a probabilidade anual de falha ultrapassa o limite de referência para determinados cenários de duração da precipitação. A partir da análise, são avaliadas duas possíveis medidas de redução do risco: a implementação de um sistema de bombagem e a construção de um vertedouro de emergência. Neste caso, a construção do vertedouro de emergência proporciona uma redução do risco mais significativa e consistente para todos os cenários analisados.

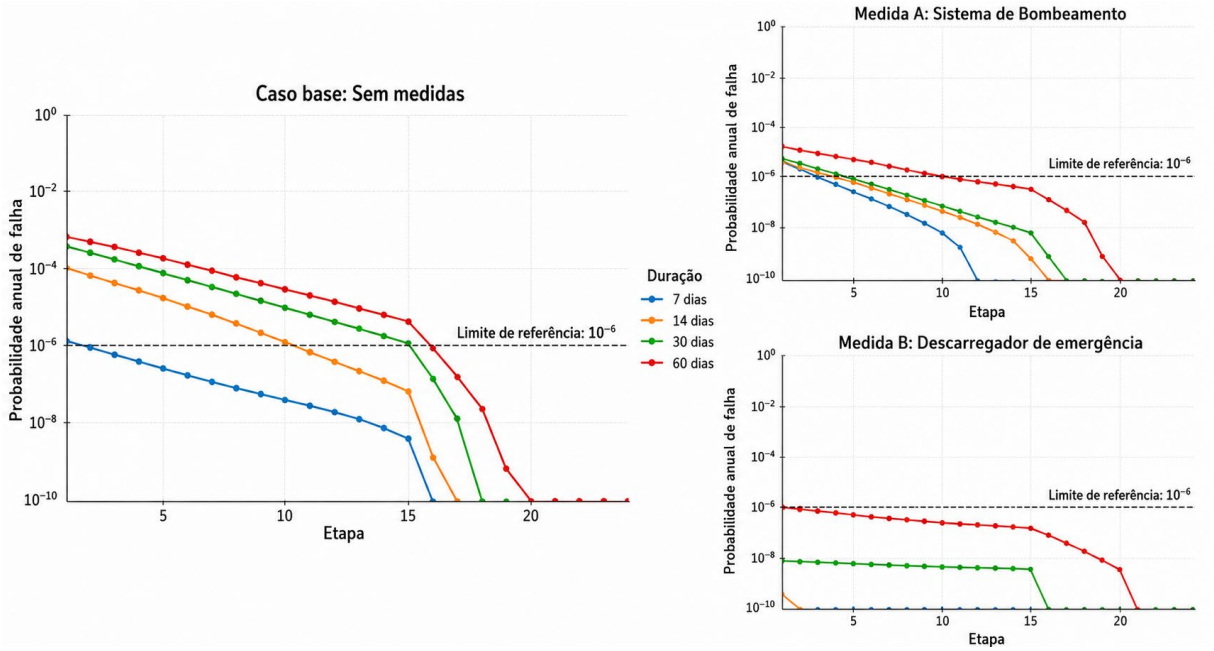


Figura 6 – Comparação da probabilidade anual de falha por galgamento para diferentes cenários de duração da precipitação, no caso base e após a implementação de medidas de redução do risco.

Embora este nível de análise exija um esforço significativamente superior ao dos níveis anteriores, a sua aplicação constitui uma ferramenta extremamente robusta para apoiar decisões complexas e justificar tecnicamente medidas de redução do risco.

5. GESTÃO CONTÍNUA DO RISCO

A gestão contínua do risco constitui um princípio fundamental do GISTM, estabelecendo que as avaliações de risco devem ser realizadas e atualizadas periodicamente, pelo menos a cada três anos, ou sempre que ocorram alterações significativas na instalação. Esta abordagem permite manter o conhecimento do risco permanentemente atualizado, refletindo novas condições operacionais, alterações nas hipóteses consideradas e avanços na informação disponível.

A atualização contínua do risco possibilita ainda incorporar dados provenientes da auscultação da barragem, de novas avaliações geotécnicas e hidrológicas, bem como alterações regulamentares ou novas recomendações internacionais. Desta forma, as revisões periódicas permitem não apenas validar as estimativas previamente realizadas, mas também ajustar medidas de mitigação e adaptar o planeamento às condições evolutivas da instalação.

5.1 Integração da análise na tomada de decisão

A análise de risco deve estar integrada de forma contínua nos processos de tomada de decisão. Mais do que um exercício isolado, a análise passa a constituir um suporte ativo para decisões operacionais, de investimento e de gestão ao longo de todo o ciclo de vida da barragem de rejeitos. Isto implica que as revisões e atualizações do risco sejam incorporadas nos procedimentos regulares de gestão da instalação, permitindo priorizar e ajustar medidas de redução do risco à medida que nova informação se torna disponível.

Adicionalmente, a gestão contínua do risco favorece a comunicação entre os diferentes intervenientes envolvidos no processo de decisão, incluindo equipas de operação, o Engineer of Record (EoR), especialistas ambientais e equipas corporativas de gestão do risco. Esta interação contínua e a atualização sistemática das avaliações contribuem para melhorar a tomada de decisão e garantir que as medidas implementadas permanecem adequadas face à evolução das condições da barragem.

5.2 Ferramentas de apoio e rastreabilidade

A utilização de plataformas digitais de gestão do risco constitui um elemento de apoio relevante para a implementação de esquemas de gestão contínua do risco, especialmente em contextos onde são geridas múltiplas barragens de rejeitos. Estas ferramentas permitem consolidar num único ambiente toda a informação relacionada com modos de falha, classificação do risco e medidas de mitigação propostas.

Uma das principais vantagens destas plataformas reside na possibilidade de visualizar e comparar o nível de risco entre diferentes instalações de um mesmo portefólio, facilitando a identificação das estruturas e modos de falha mais críticos. Isto permite estabelecer prioridades globais de atuação e apoiar o planeamento de investimentos em segurança de forma mais objetiva, consistente e rastreável.

Adicionalmente, estas plataformas facilitam o acompanhamento das medidas implementadas e a atualização periódica das avaliações de risco. Desta forma, a análise de risco deixa de ser um exercício pontual e passa a integrar um processo dinâmico e contínuo de gestão e suporte à tomada de decisão. A Figura 7 apresenta um exemplo de visualização da classificação do risco e priorização de medidas à escala de portefólio numa plataforma digital de gestão do risco.

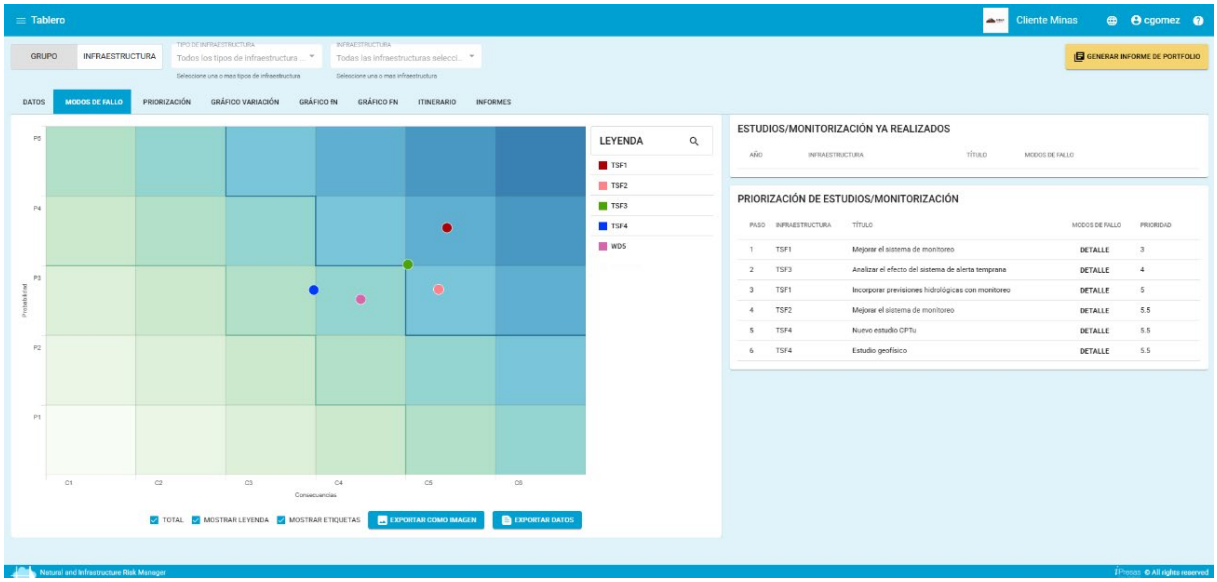


Figura 7 – Exemplo de visualização da classificação do risco e priorização de medidas à escala de portfolio numa plataforma de gestão do risco.

6. BENEFÍCIOS E LIÇÕES APRENDIDAS

A experiência adquirida na aplicação deste tipo de metodologias em barragens de rejeitos demonstra que o principal valor da abordagem baseada no risco não reside apenas na estimativa do risco, mas sobretudo na sua capacidade de apoiar a tomada de decisão e priorizar intervenções de forma objetiva, consistente e rastreável.

Conforme referido anteriormente, a aplicação destes enfoques permite identificar as estruturas mais críticas do portefólio, otimizar a priorização de investimentos e comparar diferentes alternativas de projeto, operação ou mitigação em função do seu impacto efetivo na redução do risco. Paralelamente, a integração da análise num esquema de gestão contínua favorece a atualização sistemática da informação e a sua adaptação às condições evolutivas da instalação.

Para além dos benefícios técnicos, esta abordagem contribui também para reforçar a governação e a rastreabilidade das decisões, facilitando o alinhamento com normas e referências internacionais, como o GISTM, e promovendo maior transparência perante as partes interessadas e entidades reguladoras.

A experiência acumulada na aplicação destas metodologias permitiu igualmente identificar um conjunto de lições aprendidas relevantes para aumentar a eficácia dos processos de análise e gestão do risco. Entre os aspetos mais importantes destacam-se a necessidade de uma participação verdadeiramente multidisciplinar, a adaptação do nível de detalhe das análises ao contexto de decisão e a integração contínua da análise de risco nos processos regulares de gestão e tomada de decisão.

A Figura 8 resume os principais benefícios e lições aprendidas associados à aplicação de metodologias de análise e gestão contínua do risco em barragens de rejeitos.



Figura 8 – Principais benefícios e lições aprendidas associados à gestão contínua do risco em barragens de rejeitos.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um enfoque prático para a aplicação de metodologias de análise e gestão contínua do risco em barragens de rejeitos, integrando ferramentas como PFMA, SQRA e QRA num esquema progressivo orientado para apoiar a tomada de decisão ao longo do ciclo de vida da instalação.

A experiência obtida em mais de quarenta workshops realizados em diferentes contextos operacionais demonstra que as análises PFMA/SQRA ao nível de "screening" fornecem, na maioria dos casos, uma base robusta e eficiente para identificar os principais "risk drivers", priorizar intervenções e orientar a gestão do risco. As análises mais detalhadas devem ser aplicadas de forma seletiva, apenas quando o contexto de decisão justificar um maior esforço analítico.

Um dos principais ensinamentos obtidos é que o valor destas metodologias não reside exclusivamente na estimativa do risco, mas sobretudo na sua capacidade de estruturar a discussão técnica, integrar diferentes perspetivas e apoiar processos de tomada de decisão mais objetivos, rastreáveis e alinhados com o risco real da instalação.

Adicionalmente, a integração da análise num esquema de gestão contínua permite manter atualizada a caracterização do risco à medida que as condições da barragem evoluem, novas medidas são implementadas ou se torna disponível informação adicional. Esta abordagem favorece uma gestão mais adaptativa e melhora a priorização de investimentos e intervenções, tanto ao nível individual como à escala de portefólio.

De forma global, a aplicação de enfoques de gestão contínua do risco constitui uma ferramenta extremamente relevante para reforçar a governação, a rastreabilidade e a capacidade de decisão em barragens de rejeitos, proporcionando uma via prática para evoluir para modelos de gestão mais robustos, transparentes e alinhados com os princípios do GISTM.

8. PALAVRAS-CHAVE

Barragens de rejeitos, análise de risco, GISTM, identificação de modos de falha, gestão contínua do risco.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ICOLD, 2011. Improving Tailings Dam Safety: Critical Aspects of Management, Design, Operation and Closure, Boletín 139. International Commission on Large Dams, Paris.

[2] SPANCOLD, 2012. Guía técnica de explotación de presas y embalses, Tomo 1. Análisis de riesgos aplicado a la gestión de seguridad de presas y embalses. Comité Nacional Español de Grandes Presas, Madrid.

[3] USACE, 2014. Safety of Dams: Policy and Procedures, Engineer Regulation 1110-2-1156. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.

[4] FERC, 2016. Risk-Informed Decision-Making Guidelines, Chapter 2 Risk Analysis. Federal Energy Regulatory Commission, Washington, DC.

[5] USBR and USACE, 2019. Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis, Part I Risk Analysis Basics. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.

[6] CWC, 2019. Guidelines for Assessing and Managing Risks Associated with Dams, Doc. No. CDSO_GUD_DS_10_v1.0. Central Water Commission, Ministry of Water Resources, River Development & Ganga Rejuvenation, Government of India, New Delhi.

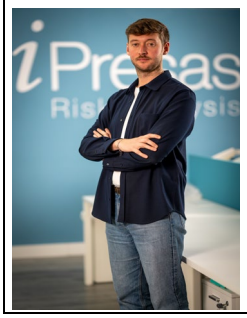
[7] ICMM, UNEP and PRI, 2020. Global Industry Standard on Tailings Management. Global Tailings Review, London.

[8] World Bank, 2021. Safety of dams and downstream communities, Technical Note 5: Potential Failure Mode Analysis. World Bank, Washington, DC.

[9] ANCOLD, 2022. Guidelines on Risk Assessment. Australian National Committee on Large Dams, Hobart, TAS.

[10] ICOLD, 2025. Tailings Dam Safety, Boletín 194. International Commission on Large Dams, Paris.

[11] ICMM, 2025. Tailings Management – Good Practice Guide. International Council on Mining and Metals, London.

	**Adrián MORALES TORRES** Dr. em Engenharia Civil pela UPV (Espanha), com mais de 15 anos de experiência em segurança de barragens e análise de risco em mais de 200 infraestruturas a nível internacional. Lidera a implementação de sistemas de gestão do risco em mais de 300 barragens em Espanha e colabora com governos e entidades globais. Autor de mais de 120 publicações e especialista em GISTM.
	**Ignacio ESCUDER BUENO** Dr. em Engenharia Civil, Professor Catedrático na UPV (Espanha) e sócio fundador da iPresas. Com quase 30 anos de experiência internacional, é especialista em segurança de barragens, análise de risco e modelação numérica. Liderou projetos em todo o mundo e colaborou com instituições como BID, Banco Mundial e ICOLD. Autor de mais de 150 publicações.
	**Marco SILVA** MSc em Engenharia Civil pela FEUP (Portugal), com período académico na UPV (Espanha). Atualmente é Engenheiro de Projetos na área de análise de riscos aplicada a barragens e infraestruturas hidráulicas. Participa em projetos internacionais, como o NWRDP em Moçambique. Conta com experiência prévia em obra civil no Quénia e em desenvolvimento de negócio.
	**Francisco GARCÍA BROOK** MSc em Engenharia Civil pela UPV (Espanha). Especializa-se em análise de risco aplicada à segurança de barragens de rejeitos, apoiando decisões alinhadas com o GISTM. Participou em mais de 65 workshops e avaliou mais de 30 depósitos de rejeitos em projetos internacionais. Atua também em formação e estudos de segurança de barragens e adaptação climática.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

AVALIAÇÃO DE RISCOS EM BARRAGEM DE CONCRETO E BARRAGEM DE TERRA POR METODOLOGIA FMEA

Ingrid VIANA
GWS Engenharia

Ana Caroline ÁGUIDO
GWS Engenharia

Lucas BRASIL
GWS Engenharia

Mariana da COSTA
GWS Engenharia

Camila CHAVES
GWS Engenharia

RESUMO

Barramentos de concreto e barragens de terra/aterro destinados à contenção de sedimentos apresentam comportamentos distintos em função da tipologia construtiva, dos materiais empregados, das condições de fundação e dos sistemas de controle existentes. Nesse contexto, a análise de riscos auxilia na identificação dos modos de falha, suas causas, efeitos e controles capazes de prevenir, detectar ou mitigar a evolução dos cenários. Este artigo tem como objetivo aplicar a metodologia *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) na avaliação qualitativa de riscos de duas estruturas hipotéticas, denominadas Barragem C1 e Barragem T1, caracterizadas a partir de informações públicas disponibilizadas nos Planos de Ação de Emergência das estruturas utilizadas como referência. A Barragem C1 representa um barramento de concreto, enquanto a Barragem T1 representa uma barragem de terra/aterro. Para a C1, foram avaliados os modos de falha por instabilização da fundação e falha estrutural no maciço de concreto. Para a T1, foram analisados os modos de falha por instabilização e galgamento. Para cada cenário, foram atribuídas notas de probabilidade, impacto e detecção, considerando os componentes afetados, os efeitos intermediários observáveis e os controles existentes, como inspeções, instrumentação, videomonitoramento, estudos técnicos e ações previstas no PAEBM. Os resultados indicaram baixa criticidade para os cenários avaliados, devido à baixa probabilidade de ocorrência e à capacidade de detecção dos sinais precursores antes da evolução para ruptura. Conclui-se que a tipologia da barragem influencia diretamente os mecanismos de falha, os efeitos observáveis e os controles aplicáveis, sendo a FMEA adequada para comparar e hierarquizar riscos em estruturas com comportamentos distintos.

ABSTRACT

Concrete dams and earthfill dams intended for sediment containment have different behaviors depending on their construction type, materials, foundation conditions, and existing control systems. In this context, risk analysis supports the identification of failure modes, their causes, effects, and controls capable of preventing, detecting, or mitigating the evolution of risk scenarios. This paper aims to apply the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) methodology to the qualitative risk assessment of two hypothetical structures, named Dam C1 and Dam T1, characterized based on public information available in the Emergency Action Plans of the reference structures. Dam C1 represents a concrete dam, while Dam T1 represents an earthfill dam. For C1, the failure modes assessed were foundation instability and structural failure in the concrete body. For T1, the failure modes analyzed were instability and overtopping. For each scenario, probability, impact, and detection scores were assigned, considering the affected components, observable intermediate effects, and existing controls, such as inspections, instrumentation, video monitoring, technical studies, and actions provided in the PAEBM. The results indicated low criticality for the assessed scenarios, mainly due to the low probability of occurrence and the ability to detect warning signs before progression to failure. It is concluded that dam typology directly influences failure mechanisms, observable effects, and applicable controls, making FMEA a suitable methodology for comparing and ranking risks in structures with different behaviors.

1. INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas hidráulicas utilizadas para contenção, armazenamento e regularização de água, podendo atender a diferentes finalidades, como abastecimento, controle de cheias, geração de energia, uso industrial, contenção de sedimentos e apoio a empreendimento minerários. Entre as tipologias mais comuns, destacam-se as barragens de terra e os barramentos de concreto, cujas características construtivas, condições de desempenho e mecanismos de falha apresentam diferenças significativas.

As barragens de terra são estruturas geotécnicas constituídas predominantemente por materiais naturais compactados, cujo desempenho depende da qualidade dos materiais empregados, das condições de fundação, do controle de compactação, dos sistemas de drenagem interna e superficial e do comportamento hidráulico do maciço. Por sua vez, os barramentos de concreto apresentam comportamento mais associado à resistência estrutural do maciço de concreto, à interação com a fundação rochosa, à estabilidade frente aos esforços hidráulicos e à capacidade de controle de subpressões, fissuras e juntas.

Embora ambas as tipologias possam estar submetidas a solicitações semelhantes, como elevação do nível do reservatório, eventos hidrológicos extremos, variações de carregamento e degradação ao longo do tempo, a resposta estrutural de cada uma é diferente. Na barragem de terra, os processos de percolação, erosão interna e instabilidade de taludes tendem a ser mais relevantes. Já no barramento de concreto, mecanismos como fissuração, subpressão, perda de aderência com a fundação, tombamento, deslizamento e instabilidade estrutural assumem maior importância.

Nesse contexto, a análise de riscos é uma ferramenta fundamental para a gestão da segurança de barragens, pois permite identificar os principais modos de falha, avaliar suas causas, compreender seus efeitos e classificar sua criticidade. A utilização de uma metodologia única de análise, aplicada a diferentes tipologias, permite comparar os resultados de forma padronizada, evidenciando como cada estrutura responde aos mesmos critérios de avaliação.

Dentre as metodologias disponíveis, a *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) se destaca por sua estrutura organizada em torno dos modos de falha, causas, efeitos, controles existentes e classificação dos riscos. Essa abordagem permite avaliar os riscos de forma qualitativa e comparativa, auxiliando na priorização das ações de inspeção, monitoramento, manutenção e tratamento.

Diante disso, este artigo tem como objetivo aplicar a metodologia FMEA na avaliação qualitativa de riscos de uma barragem de concreto e de uma barragem de terra destinadas ao armazenamento de água. A análise busca identificar diferenças quanto à natureza dos riscos, aos mecanismos de falha predominantes e à classificação de criticidade obtida para cada tipologia estrutural.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Barragens de terra

Barragens de terra são estruturas construídas com solos compactados, podendo ser homogêneas ou zoneadas, e seu desempenho depende das propriedades dos materiais empregados, das condições de fundação, do controle de compactação, da geometria dos taludes e da eficiência dos sistemas de drenagem. Conforme [1] o comportamento de barragens de terra, estrutura avaliada no artigo, é fortemente influenciado pelos aspectos geotécnicos e geológicos envolvidos no projeto, na construção e na avaliação de estruturas existentes.

No Brasil, de acordo com os dados apresentados em [2], há 28.085 barragens cadastradas. Entre as diferentes tipologias identificadas, as barragens de terra homogênea e de terra zoneada constituem o grupo mais representativo, somando cerca de 56% do total registrado. Essa maior ocorrência pode estar relacionada às condições naturais do território brasileiro, como a presença frequente de vales mais amplos, além da disponibilidade de materiais terrosos apropriados para a execução desse tipo de estrutura [2].

2.2 Barramentos de concreto

Barramentos de concreto são estruturas rígidas cujo desempenho está associado à resistência do corpo de concreto, à geometria da estrutura, à interação com a fundação e ao equilíbrio frente às ações atuantes. Em barragens de gravidade, estrutura analisada no artigo, a estabilidade depende da relação entre peso próprio, empuxo hidrostático, subpressão, resistência ao cisalhamento na base e condições da fundação [3].

No Brasil, conforme os dados apresentados em [2], dentre as 28.085 barragens cadastradas, os barramentos de concreto representam a segunda tipologia mais recorrente, correspondendo a aproximadamente 6% do total registrado.

2.3 Segurança de barragens e análise de riscos

Segundo [4], a segurança de barragens não deve ser entendida apenas como a estabilidade física da estrutura, mas como um processo integrado, que envolve conhecimento técnico, critérios de projeto, qualidade construtiva, operação, monitoramento, governança, gestão de riscos, preparação para emergências, recuperação, divulgação pública e acesso à informação.

Ainda conforme o [4], a segurança de barragens deve ser tratada de forma contínua ao longo de todo o ciclo de vida da barragem, desde a concepção, projeto e construção até a operação, fechamento e pós-fechamento. Nesse processo, inspeções, monitoramento, manutenção e revisões periódicas são fundamentais para acompanhar o desempenho da estrutura e identificar alterações que possam indicar a evolução de mecanismos associados a possíveis modos de falha.

Nesse contexto, a análise de riscos constitui uma ferramenta essencial para a gestão da segurança de estruturas de contenção de sedimentos, pois permite identificar eventos indesejáveis, compreender seus mecanismos de ocorrência e estimar suas consequências. Nessas estruturas, os modos de falha podem variar conforme a tipologia construtiva. Em barragens de terra, destacam-se mecanismos como erosão interna, instabilidade, galgamento e liquefação. Em barramentos de concreto, os mecanismos estão mais associados ao comportamento estrutural, à fundação e à

ação hidráulica, podendo envolver instabilidade, tombamento, flutuação, falha estrutural e deslizamento.

Conforme [5], a gestão de riscos deve iniciar pela definição do contexto da análise, considerando fatores internos e externos que possam influenciar a avaliação. Em seguida, devem ser contempladas as etapas de identificação, análise, avaliação e tratamento dos riscos, além do monitoramento, da análise crítica, da comunicação e da consulta às partes interessadas.

Assim, no âmbito das barragens de terra e dos barramentos de concreto, a gestão de riscos apoia a tomada de decisão técnica, orienta ações de monitoramento e controle, auxilia na priorização de intervenções e contribui para reduzir a ocorrência de eventos indesejáveis. Nesse sentido, a metodologia FMEA permite organizar a identificação dos modos de falha, suas causas, efeitos e controles existentes, fortalecendo uma abordagem preventiva para a segurança dessas estruturas.

2.4 Metodologia FMEA

A metodologia FMEA é uma metodologia estruturada de análise de riscos utilizada para identificar possíveis modos de falha, suas causas, seus efeitos e os controles existentes. Conforme [6], na FMEA, o risco é avaliado a partir da combinação entre a probabilidade de ocorrência da falha e a severidade de suas consequências, podendo ser utilizado na análise de estruturas geotécnicas, equipamentos, processos e sistemas associados à mineração.

No caso de estruturas geotécnicas em mineração, [6] indica que as consequências de uma falha devem ser avaliadas de forma ampla, considerando diferentes dimensões, como impactos econômicos, ambientais, regulatórios, de saúde e segurança, além de efeitos sobre a percepção pública e a imagem institucional.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste estudo foi estruturada para aplicar a FMEA na análise qualitativa de riscos de duas estruturas hipotéticas destinadas a retenção de sedimentos: uma barragem de terra e um barramento de concreto. As estruturas foram consideradas de forma conceitual, com finalidade acadêmica e metodológica, não correspondendo à avaliação oficial de segurança de barragens reais específicas.

O procedimento metodológico foi dividido em cinco etapas principais: caracterização das estruturas avaliadas; definição dos modos de falha; identificação dos componentes, solicitações, causas e efeitos; aplicação da metodologia FMEA; e comparação dos resultados obtidos entre as duas tipologias. A Figura 1 apresenta o fluxograma simplificado das etapas metodológicas desenvolvidas.

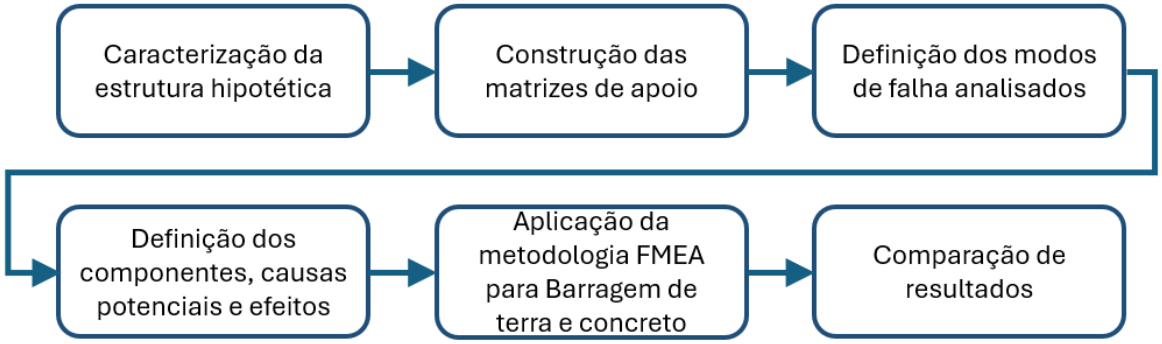


Figura 1 – Fluxograma para definição dos materiais e métodos.

3.1 Caracterização da estrutura hipotética

As estruturas foram caracterizadas com base em informações técnicas disponibilizadas publicamente na internet, especialmente nos Planos de Ação de Emergência das estruturas utilizadas como referência. No entanto, para fins deste artigo, elas foram denominadas Barragem C1 e Barragem T1, uma vez que o objetivo do estudo é acadêmico e metodológico, sem intenção de realizar avaliação oficial das estruturas reais.

3.2 Construção das matrizes de apoio

Em seguida, foram construídas as matrizes de apoio utilizadas para a classificação dos riscos. Essas matrizes foram elaboradas especificamente para este estudo, com o objetivo de padronizar a atribuição das notas de probabilidade, impacto e detecção/controle.

A classificação dos riscos foi realizada com base nos critérios de probabilidade, impacto e detecção/controle, aplicados na metodologia FMEA quanto. A probabilidade variou de L1 a L6 (quase impossível a frequente ou iminente), enquanto o impacto variou de C1 a C6 (insignificante a muito crítico), contemplando as dimensões de saúde e segurança, financeiro, ambiental, reputacional, legal/regulatório e social/comunidade. A detecção/controle variou de D1 a D6 (detecção praticamente certa a ausência de detecção confiável), considerando a capacidade dos controles existentes de identificar o risco ou seus sinais precursores antes da evolução para estágios mais críticos.

Entre a Tabela 1 e a Tabela 2 são apresentaras, respectivamente, os critérios adotados para a classificação da probabilidade, dos controles e dos impactos.

Tabela 1– Critérios de Classificação da Probabilidade.

Classificação	Nota	Descrição resumida
L1 Quase impossível	1	Modo de falha tecnicamente admissível, porém extremamente improvável nas condições atuais de projeto, operação e monitoramento. Não há registros conhecidos na estrutura nem indicação de deficiência física relevante. Frequência indicativa: $< 10^{-5}$/ano, correspondente a uma ocorrência inferior a 1 vez a cada 100.000 anos.
L2 Remoto	2	Evento de baixa expectativa de ocorrência, que dependeria da combinação incomum de fatores adversos e da perda conjunta de controles preventivos. As condições atuais da estrutura não indicam tendência de desenvolvimento do modo de falha, embora o cenário ainda seja tecnicamente possível. Frequência indicativa: $\geq 10^{-5}$ e $< 10^{-4}$/ano, equivalente a uma ocorrência entre 1 vez a cada 100.000 anos e 1 vez a cada 10.000 anos.
L3 Improvável, mas possível	3	Evento pouco provável durante a operação normal da estrutura, porém possível em situações anômalas, falhas pontuais ou processos localizados de degradação. Pode existir registro de condições iniciadoras semelhantes, desde que não estejam associadas à perda significativa dos

Classificação	Nota	Descrição resumida
		controles preventivos. As deficiências físicas, quando presentes, tendem a ser inexistentes ou pouco relevantes. A frequência indicativa situa-se entre ≥ 10^{-4} e < 10^{-3}/ano, correspondente a uma ocorrência estimada entre 1 vez a cada 10.000 anos e 1 vez a cada 1.000 anos.
L4 Provável	4	Modo de falha plausível ao longo da vida útil da estrutura, especialmente em situações de perda de desempenho, manutenção inadequada ou limitação dos controles existentes. Pode estar associado, de forma isolada ou combinada, à presença de deficiência física significativa, histórico de eventos iniciadores ou indícios indiretos de evolução do modo de falha. Frequência indicativa: ≥ 10^{-3} e < 10^{-2}/ano, equivalente a uma ocorrência entre 1 vez a cada 1.000 anos e 1 vez a cada 100 anos.
L5 Muito provável	5	Evento com alta possibilidade de ocorrência caso não sejam adotadas ações corretivas ou medidas de mitigação. Pode envolver, isolada ou conjuntamente, histórico de ocorrência, degradação relevante, falhas recorrentes de controles ou evidências diretas de progressão do modo de falha. Frequência indicativa: ≥ 10^{-2} e < 10^{-1}/ano, equivalente a uma ocorrência entre 1 vez a cada 100 anos e 1 vez a cada 10 anos.
L6 Frequente ou iminente	6	Cenário recorrente, em evolução evidente ou próximo de ocorrer na ausência de intervenção imediata. Pode estar associado, de forma isolada ou combinada, à inexistência, ineficácia ou superação dos controles, à condição crítica observada em campo ou à tendência clara de recorrência do evento. Frequência indicativa: ≥ 10^{-1}/ano, correspondente a uma ocorrência igual ou superior a 1 vez a cada 10 anos, ou a uma condição iminente.

Salienta-se que a frequência indicativa anual deve ser entendida como referência para apoio à classificação da probabilidade. A atribuição da nota deve considerar a presença isolada e/ou combinada dos critérios descritos em cada categoria, sempre mediante julgamento técnico fundamentado. A existência de um único critério não implica, automaticamente, o enquadramento na respectiva nota, devendo ser avaliada sua relevância, intensidade, persistência e relação com o modo de falha analisado.

Tabela 2– Critérios de classificação dos Controles.

Classificação	Nota	Descrição
D1 - Detecção praticamente certa	1	Os controles disponíveis apresentam alta confiabilidade para identificar o modo de falha ou seus sinais precursores de forma antecipada, permitindo a adoção de medidas preventivas antes da ocorrência de consequências relevantes.
D2 - Alta probabilidade de detecção	2	Os controles existentes possuem boa capacidade de identificação antecipada do modo de falha, possibilitando avaliação técnica e resposta em tempo adequado.
D3 - Detecção parcial	3	A identificação do modo de falha é possível, porém limitada, dependendo da frequência dos controles, da qualidade dos dados disponíveis e da interpretação técnica das evidências observadas.
D4 - Baixa eficácia de detecção	4	Os controles apresentam capacidade reduzida para identificar o modo de falha de forma antecipada, podendo a detecção ocorrer somente quando os sinais já estiverem mais evidentes.
D5 - Detecção pouco provável	5	A identificação prévia do modo de falha é pouco provável antes da manifestação dos efeitos associados, indicando limitações importantes nos controles existentes.
D6 - Ausência de detecção confiável	6	Não há controle confiável para detectar o modo de falha ou seus sinais precursores. A condição tende a ser reconhecida apenas após a ocorrência das consequências, tornando a resposta predominantemente reativa.

Tabela 3– Critérios de Classificação dos Impactos.

Classificação	Nota	Pessoas	Financeiro	Meio Ambiente	Reputacional	Legal e Regulatória	Social e Comunidade
C1 – Insignificante	**1**	Sem ferimentos ou ocorrência restrita a primeiros socorros, sem afastamento ou sequela.	**< R$ 100.000**	Impacto pontual, de baixa magnitude, totalmente reversível, sem perda de integridade ambiental e controlável por medidas simples.	Repercussão restrita ao ambiente interno, sem envolvimento relevante da comunidade, imprensa ou partes externas.	Sem descumprimento legal ou de normas internas da empresa.	Sem impacto social, sobre a comunidade, o patrimônio cultural, os serviços locais ou as condições habituais de vida da população.
C2 – Leve	**2**	Ocorrência com necessidade de atendimento médico, sem incapacidade permanente e com recuperação esperada.	**R$ 100.000 a R$ 1.000.000**	Impacto localizado, de baixa magnitude, com recuperação em curto prazo e necessidade de medidas simples de controle ou correção. A integridade do ambiente afetado é restabelecida em até 1 semana após o evento.	Reclamações pontuais ou preocupação restrita à comunidade local, com baixo engajamento de partes interessadas e sem exposição significativa.	Não conformidade ou desvio passível de controle interno, sem sanção significativa ou judicialização.	Impacto localizado, de pequena intensidade e reversíveis, limitados a pessoas, bens, atividades locais ou à rotina comunitária.
C3 – Moderado	**3**	Lesão ou condição com incapacidade temporária e necessidade de afastamento.	**R$ 1.000.000 a R$ 10.000.000**	Impacto de média magnitude, com abrangência local, necessidade de ação corretiva estruturada e acompanhamento. A integridade do ambiente afetado é restabelecida entre 1 semana e 4 anos após o evento.	Reclamações recorrentes, questionamentos comunitários, manifestações pontuais ou atenção da mídia local, exigindo resposta institucional organizada.	Questão legal ou regulatória com necessidade de correção formal, registro, resposta estruturada ou acompanhamento junto às partes interessadas.	Impacto social local e temporário ou de médio prazo, com duração temporária ou intermediária, podendo afetar atividades, serviços, bens ou formas de vida, porém com possibilidade de recomposição.
C4 – Significativo	**4**	Lesão grave, deficiência permanente ou comprometimento funcional relevante.	**R$ 10.000.000 a R$ 100.000.000**	Impacto significativo, com perda funcional relevante, abrangência ampliada, recuperação prolongada e necessidade de reparação, compensação ou monitoramento continuado. A integridade do ambiente afetado é restabelecida entre 4 e 8 anos após o evento.	Mobilização comunitária relevante, atenção da mídia regional ou envolvimento de autoridades, lideranças e partes interessadas externas..	Violação relevante, com possibilidade de autuação, notificação, reporte formal, imposição de condicionantes adicionais ou atuação de autoridade competente.	Danos relevantes e persistentes de aspectos comunitários, atividades econômicas, bens culturais, serviços locais ou condições de vida, demandando medidas organizadas de resposta.
C5 – Crítico	**5**	Múltiplas incapacidades, doença ocupacional grave ou lesões severas.	**R$ 100.000.000 a R$ 1.000.000.000**	Impacto ambiental grave, extenso ou de difícil reversão, com alteração importante da integridade ambiental, necessidade de reparação complexa e mobilização de recursos internos e externos. A integridade do ambiente afetado é restabelecida entre 8 e 12 anos após o evento.	Repercussão nacional, com forte pressão de comunidades, mídia, órgãos públicos, investidores, organizações sociais ou movimentos coletivos.	Violação regulatória grave, com possibilidade de ação judicial significativa, sanções relevantes, restrições operacionais ou obrigações corretivas extensas.	Impactos sociais persistentes, extensos e relevantes com prejuízos expressivos a comunidades, bens culturais, atividades econômicas, modos de vida ou serviços essenciais.
C6 – Muito crítico	**6**	Uma ou mais fatalidades.	**> R$ 1.000.000.000**	Impacto ambiental catastrófico, com comprometimento severo de funções ecológicas, perda de integridade ambiental, recuperação incerta ou não restabelecimento em horizonte previsível. A integridade ambiental é restabelecida somente após 12 anos ou pode não ser plenamente recuperada.	Crise reputacional ampla, com clamor público intenso, repercussão internacional, campanhas de grande alcance ou perda severa de confiança institucional.	Multas significativas, suspensão ou perda de licenças, paralisação relevante, intervenção externa ou perda do direito de operar.	Impacto social extremo, generalizado e de longa duração, podendo envolver deslocamento de pessoas, desestruturação de modos de vida, perdas culturais relevantes ou violação de direitos fundamentais.

3.3 Definição dos modos de falha avaliados

Após a construção das matrizes de apoio, foram definidos os modos de falha a serem avaliados no estudo. Para cada uma das estruturas, foram considerados dois modos de falha para a comparação, descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Descrição dos modos de falha considerados no estudo

Tipologia	Modo de falha	Descrição
Barramento de concreto	Instabilização	Perda da condição de equilíbrio da estrutura, podendo envolver deslocamentos, deformações, trincas ou redução do fator de segurança, em função da redução da resistência dos materiais ou do aumento das solicitações atuantes.
Barramento de concreto	Falha estrutural	Perda parcial ou total da capacidade resistente de um elemento estrutural, podendo envolver fissuração, ruptura localizada, deslocamentos excessivos ou comprometimento da integridade da estrutura.
Barragem de terra	Instabilização	Perda da condição de equilíbrio do maciço, taludes, fundação ou ombreiras, podendo envolver trincas, abatimentos, deslocamentos, deformações ou redução do fator de segurança.
Barragem de terra	Galgamento	Elevação do nível d'água do reservatório até atingir ou ultrapassar a crista da barragem, podendo gerar escoamento não controlado, erosões, danos localizados e eventual evolução para ruptura.

3.4 Definição dos componentes, causas potenciais e efeitos

Para cada modo de falha analisado, foram definidos o componente associado, a solicitação atuante, a causa potencial e os efeitos potenciais. Essa organização permitiu compreender a sequência do risco, desde a condição inicial até suas possíveis consequências.

O componente corresponde ao elemento físico ou funcional da barragem relacionado ao modo de falha. A solicitação representa a condição externa que atua sobre a estrutura, como chuva intensa ou sismo natural. Já a causa potencial se refere à condição ou deficiência que pode iniciar ou favorecer o desenvolvimento do modo de falha.

Os efeitos potenciais foram divididos em três níveis: locais, intermediários e finais. Os efeitos locais representam os primeiros sinais observáveis do mecanismo; os intermediários indicam a possível evolução do processo caso os controles não sejam suficientes; e os finais correspondem às consequências mais severas, como a ruptura da barragem e a formação da onda de inundação.

3.5 Aplicação da metodologia FMEA nas Barragens TI e C1

A aplicação da metodologia FMEA foi realizada de forma qualitativa, considerando dois cenários de risco para cada estrutura avaliada. Para a Barragem C1, representativa de um barramento de concreto, foram analisados os modos de falha por instabilização da fundação e falha estrutural no maciço de concreto. A avaliação considerou os efeitos intermediários desses mecanismos, como deformações na fundação, recalques diferenciais, fissuras e trincas, sem adotar diretamente a ruptura como consequência imediata. Para cada cenário, foram atribuídas notas de probabilidade, impacto e detecção, considerando as solicitações atuantes, as causas potenciais, os componentes envolvidos e os controles existentes, como inspeções, monitoramento de deslocamentos, análise visual, estudos técnicos e ações previstas no PAEBM.

Para a Barragem T1, representativa de uma barragem de terra/aterro, também foram avaliados dois modos de falha, galgamento e intabilização. A análise considerou os efeitos observáveis antes da ruptura, como deslocamentos, deformações, elevação do nível d'água, redução da borda livre e processos erosivos. As notas de probabilidade, impacto e detecção foram atribuídas com base nas características da estrutura, na atuação dos sistemas de monitoramento, na capacidade de identificação dos sinais precursores e nos controles preventivos e de contingência disponíveis. Dessa forma, a aplicação da FMEA permitiu comparar os riscos das duas tipologias de barragem considerando não apenas a severidade dos efeitos, mas também a possibilidade de detecção e resposta antes da evolução para cenários mais críticos.

3.6 Critério de comparação dos resultados

Após a aplicação da metodologia FMEA, os resultados obtidos para a Barragem C1 e para a Barragem T1 foram comparados com o objetivo de avaliar como a tipologia construtiva influencia a classificação dos riscos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estruturação dos cenários de risco

A estruturação dos cenários foi realizada a partir da seleção de dois modos de falha representativos para cada barragem. Na Barragem C1, foram avaliados os cenários de instabilização da fundação e falha estrutural no maciço de concreto, por estarem relacionados ao desempenho da fundação, da interface concreto-fundação e do próprio corpo estrutural. Na Barragem T1, foram selecionados os cenários de instabilização e galgamento, por representarem mecanismos associados ao comportamento geotécnico do maciço, dos taludes, das ombreiras e ao desempenho hidráulico do reservatório e do sistema extravasor.

Para cada cenário, foram definidos o componente principal, a solicitação, a causa potencial e a sequência de efeitos esperados. Na Barragem C1, a instabilização foi associada a deformações na fundação e recalques diferenciais no corpo da barragem, enquanto a falha estrutural foi relacionada à abertura de fissuras e trincas no concreto. Na Barragem T1, a instabilização considerou deslocamentos, abatimentos e formação de superfície crítica de ruptura, enquanto o galgamento foi relacionado à elevação do nível do reservatório, redução da borda livre e ocorrência de processos erosivos. Esses cenários serviram de base para a atribuição das notas de probabilidade, impacto e detecção na matriz FMEA.

4.2 Resultado da aplicação da metodologia FMEA na Barragem C1

A Figura 2 apresenta o enquadramento dos cenários na matriz de riscos da metodologia FMEA. Adicionalmente, a Figura 3 sintetiza os resultados obtidos para a Barragem C1, considerando impacto, probabilidade, detecção, controles existentes e nota final de criticidade. Foram analisados dois modos de falha: instabilização da fundação e falha estrutural no maciço de concreto.

No cenário de instabilização da fundação, a probabilidade foi classificada como L1 – Quase impossível, o impacto como C4 – Alto e a detecção como D1 – Quase certa detecção, resultando em nota final 4. Essa classificação se justifica pelo fato de o

cenário depender da combinação entre percolação, presença de material de baixa resistência na interface concreto-fundação e perda progressiva de resistência. Embora pouco provável, seus efeitos intermediários, como deformações na fundação e recalques diferenciais, podem exigir investigação geotécnica, análises complementares e medidas corretivas.

Para o cenário de falha estrutural no maciço de concreto, a probabilidade foi classificada como L2 – Muito improvável, o impacto como C3 – Moderado e a detecção como D1 – Quase certa detecção, resultando em nota final 6. Nesse caso, a ocorrência está associada a carregamento sísmico excepcional, capaz de gerar fissuras e trincas na estrutura de concreto, demandando inspeções especiais, avaliações estruturais e possíveis reparos localizados.

De forma geral, os dois cenários avaliados para a Barragem C1 permaneceram em faixas de baixa criticidade na matriz FMEA. Isso se deve à baixa probabilidade de ocorrência e à existência de controles capazes de identificar os efeitos intermediários antes da evolução para ruptura, como inspeções, monitoramento de deslocamentos, estudos técnicos e ações previstas no PAEBM.

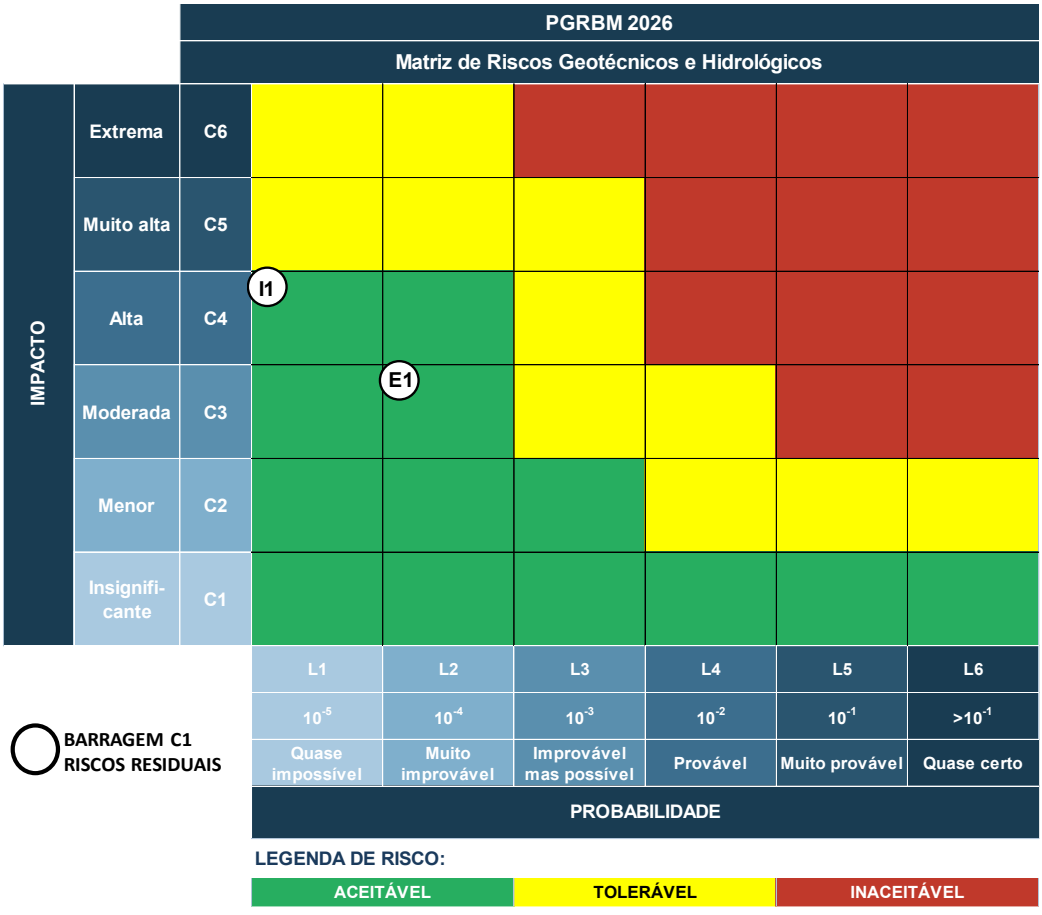
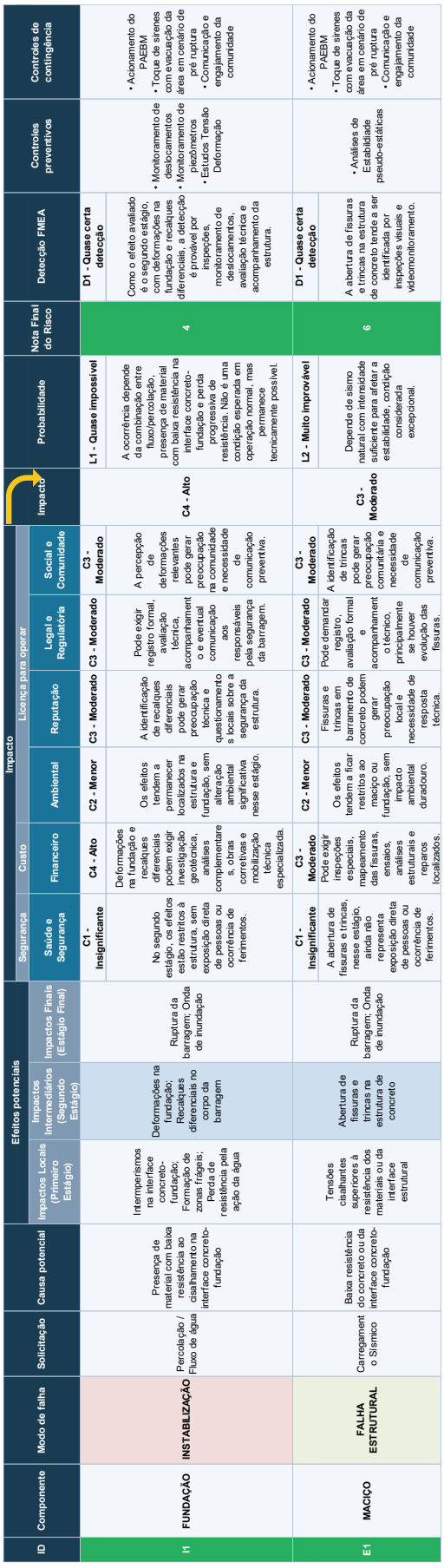


Figura 2 – Matriz de Riscos – FMEA – Barragem C1



ID	Componente	Modo de falha	Solicitação	Causa potencial	Efeitos potenciais: Impactos Locais (Primeiro Estágio)	Efeitos potenciais: Impactos Intermediários (Segundo Estágio)	Efeitos potenciais: Impactos Finais (Estágio Final)	Impacto: Segurança: Saúde e Segurança	Impacto: Custo: Financeiro	Impacto: Licença para operar: Ambiental	Impacto: Licença para operar: Reputação	Impacto: Licença para operar: Legal e Regulatória	Impacto: Licença para operar: Social e Comunidade	Impacto	Probabilidade	Nota Final do Risco	Detecção FMEA	Controles preventivos	Controles de contingência
I1	FUNDAÇÃO	INSTABILIZAÇÃO	Percolação / Fluxo de água	Presença de material com baixa resistência ao cisalhamento na interface concreto-fundação	Intemperismos na interface concreto-fundação; Formação de zonas Frágeis; Perda de resistência pela ação da água	Deformações na fundação; Recalques diferenciais no corpo da barragem	Ruptura da barragem; Onda de inundação	C1 - Insignificante No segundo estágio, os efeitos estão restritos à estrutura, sem exposição direta de pessoas ou ocorrência de ferimentos.	C4 - Alto Deformações na fundação e recalques diferenciais podem exigir investigação geotécnica, análises complementares, obras corretivas e mobilização técnica especializada.	C2 - Menor Os efeitos tendem a permanecer localizados na estrutura e fundação, sem alteração ambiental significativa nesse estágio.	C3 - Moderado A identificação de recalques diferenciais pode gerar preocupação técnica e questionamentos locais sobre a segurança da estrutura.	C3 - Moderado Pode exigir registro formal, avaliação técnica, acompanhamento e eventual comunicação aos responsáveis pela segurança da barragem.	C3 - Moderado A percepção de deformações relevantes pode gerar preocupação na comunidade e necessidade de comunicação preventiva.	C4 - Alto	L1 - Quase impossível A ocorrência depende da combinação entre fluxo/percolação, presença de material com baixa resistência na interface concreto-fundação e perda progressiva de resistência. Não é uma condição esperada em operação normal, mas permanece tecnicamente possível.	4	D1 - Quase certa detecção Como o efeito avaliado é o segundo estágio, com deformações na fundação e recalques diferenciais, a detecção é provável por inspeções, monitoramento de deslocamentos, avaliação técnica e acompanhamento da estrutura.	• Monitoramento de deslocamentos • Monitoramento de piezômetros • Estudos Tensão Deformação	• Acionamento do PAEBM • Toque de sirenes com evacuação da área em cenário de pré ruptura • Comunicação e engajamento da comunidade
E1	MACIÇO	FALHA ESTRUTURAL	Carregamento Sísmico	Baixa resistência do concreto ou da interface concreto-fundação	Tensões cisalhantes superiores à resistência dos materiais ou da interface estrutural	Abertura de fissuras e trincas na estrutura de concreto	Ruptura da barragem; Onda de inundação	C1 - Insignificante A abertura de fissuras e trincas, nesse estágio, ainda não representa exposição direta de pessoas ou ocorrência de ferimentos.	C3 - Moderado Pode exigir inspeções especiais, mapeamento das fissuras, ensaios, análises estruturais e reparos localizados.	C2 - Menor Os efeitos tendem a ficar restritos ao maciço ou fundação, sem impacto ambiental duradouro.	C3 - Moderado Fissuras e trincas em barramento de concreto podem gerar preocupação local e necessidade de resposta técnica.	C3 - Moderado Pode demandar registro, avaliação formal e acompanhamento técnico, principalmente se houver evolução das fissuras.	C3 - Moderado A identificação de trincas pode gerar preocupação comunitária e necessidade de comunicação preventiva.	C3 - Moderado	L2 - Muito improvável Depende de sismo natural com intensidade suficiente para afetar a estabilidade, condição considerada excepcional.	6	D1 - Quase certa detecção A abertura de fissuras e trincas na estrutura de concreto tende a ser identificada por inspeções visuais e videomonitoramento.	• Análises de Estabilidade pseudo-estáticas	• Acionamento do PAEBM • Toque de sirenes com evacuação da área em cenário de pré ruptura • Comunicação e engajamento da comunidade

Figura 3 – Notas e riscos avaliados – FMEA – Barragem C1

4.3 Resultado da aplicação da metodologia FMEA na Barragem T1

A Figura 5 apresenta o enquadramento dos cenários na matriz de riscos da metodologia FMEA. Adicionalmente, a Figura 4 presenta a síntese dos riscos analisados, com as respectivas notas de probabilidade, impacto, detecção e criticidade obtida.

Para a Barragem T1, foram avaliados dois modos de falha principais: instabilização do maciço/taludes e galgamento. No cenário de instabilização, a probabilidade foi classificada como L2 – Muito improvável, o impacto como C4 – Alto e a detecção como D1 – Quase certa detecção, resultando em nota final 8. Essa classificação está associada à possibilidade de evolução de deformações, deslocamentos, abatimentos ou formação de superfície crítica de ruptura, efeitos que podem exigir análises complementares, inspeções especiais e medidas corretivas. Apesar disso, a presença de instrumentos de monitoramento, inspeções periódicas, avaliações técnicas e ações previstas no PAEBM contribui para a identificação antecipada desses sinais.

No cenário de galgamento, a probabilidade foi classificada como L1 – Quase impossível, o impacto como C4 – Alto e a detecção como D1 – Quase certa detecção, resultando em nota final 4. Esse enquadramento considera que o galgamento depende de condições hidráulicas excepcionais, como elevação significativa do nível do reservatório, redução da borda livre ou perda de desempenho do sistema extravasor. Embora seja um cenário pouco provável, seus efeitos intermediários, como erosões no barramento, nas ombreiras ou no sistema extravasor, podem demandar intervenções corretivas e acompanhamento técnico.

De forma geral, os resultados indicam que os dois cenários avaliados para a Barragem T1 permaneceram em faixas de baixa criticidade na matriz FMEA. Isso ocorre porque a análise considerou os efeitos intermediários observáveis antes da ruptura, além da existência de controles capazes de detectar a evolução dos modos de falha, como inspeções, instrumentação geotécnica, monitoramento do nível do reservatório, Videomonitoramento, manutenção do sistema extravasor e procedimentos previstos no PAEBM.

.

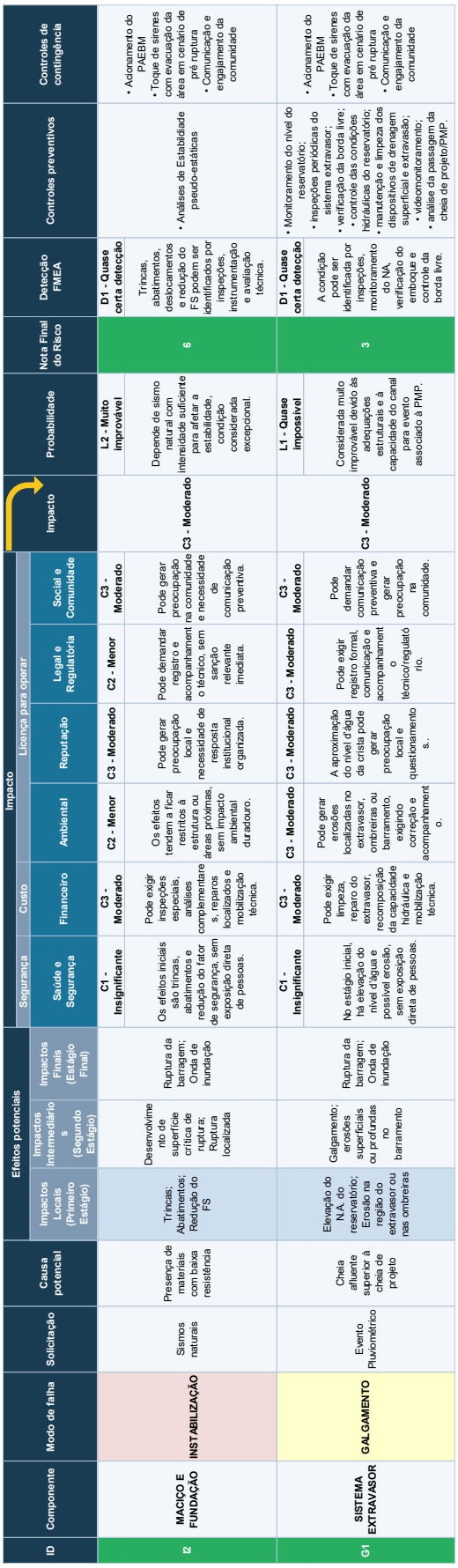


Figura 4 – Nota e riscos avaliados – FMEA – Barragem T1

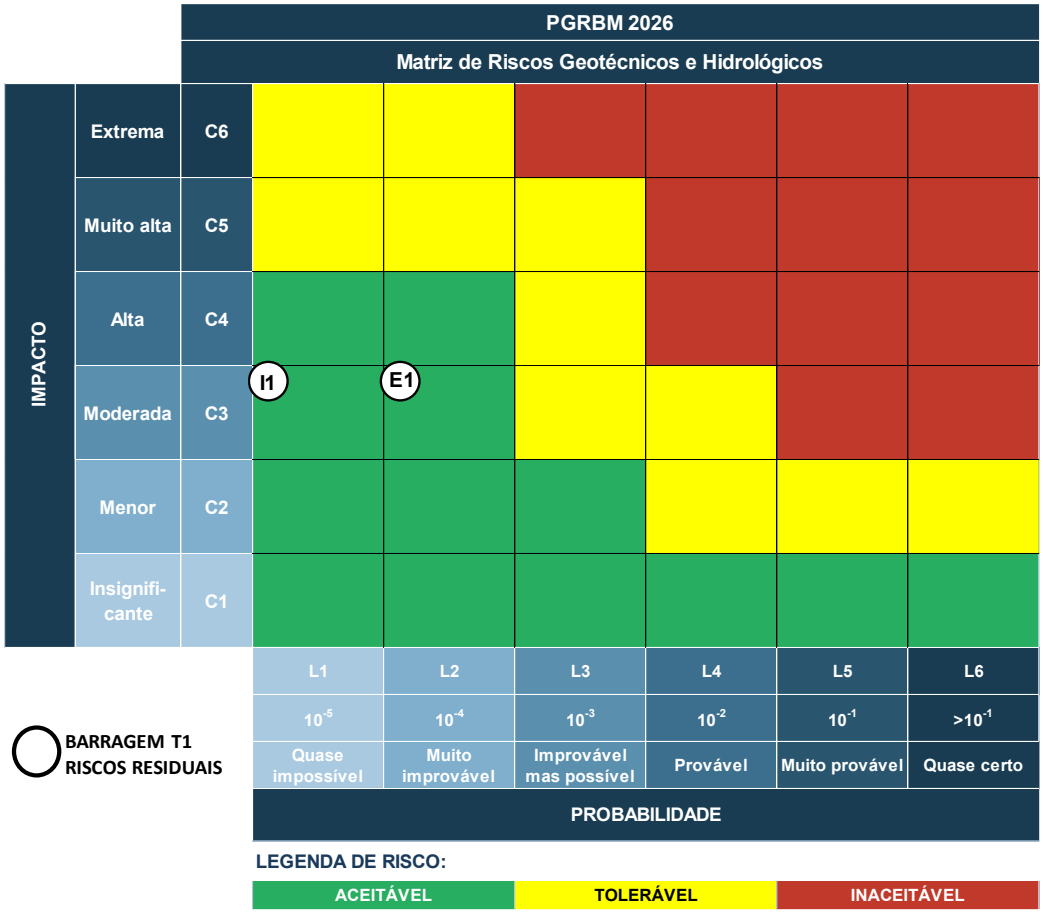


Figura 5 – Matriz de Riscos – FMEA – Barragem T1

4.4 Comparação entre as metodologias FMEA Para Barragem C1 e T1

A comparação dos resultados obtidos pela metodologia FMEA demonstrou que a tipologia construtiva influencia diretamente a natureza dos modos de falha, os efeitos avaliados e o enquadramento da criticidade dos riscos. Na Barragem C1, representativa de um barramento de concreto, os cenários avaliados estiveram associados principalmente ao comportamento da fundação, da interface concreto-fundação e do maciço estrutural. Dessa forma, os efeitos considerados envolveram deformações na fundação, recalques diferenciais, fissuras e trincas na estrutura de concreto.

Na Barragem T1, representativa de uma barragem de terra, os modos de falha avaliados estiveram mais relacionados ao comportamento geotécnico e hidráulico do maciço, como instabilização e galgamento. Nesse caso, os efeitos considerados envolveram formação de superfícies críticas de ruptura, deslocamentos, erosões no barramento, elevação do nível d'água e redução da borda livre.

Observa-se que, em ambas as estruturas, a FMEA permitiu avaliar os riscos considerando os efeitos intermediários observáveis, antes da evolução para a ruptura final. Essa abordagem possibilitou incorporar a atuação dos controles existentes, como inspeções, instrumentos de monitoramento, videomonitoramento, estudos técnicos, análises de estabilidade e ações previstas no PAEBM. Com isso, a

classificação dos riscos não foi baseada apenas na consequência final mais severa, mas também na capacidade de identificação e resposta antes da progressão do modo de falha.

De modo geral, os resultados indicam que a Barragem C1 apresentou riscos associados à integridade estrutural e ao comportamento da fundação, enquanto a Barragem T1 apresentou maior relação com processos de instabilidade do maciço e desempenho hidráulico. Assim, a FMEA mostrou-se adequada para comparar estruturas com finalidades semelhantes, mas com comportamentos distintos, permitindo hierarquizar os riscos de acordo com a probabilidade, o impacto, a detecção e os controles disponíveis.

5. CONCLUSÕES

O presente artigo teve como objetivo aplicar a metodologia FMEA na avaliação qualitativa de riscos de duas estruturas hipotéticas destinadas à contenção de sedimentos, sendo uma representativa de barramento de concreto, denominada Barragem C1, e outra representativa de barragem de terra/aterro, denominada Barragem T1.

Os resultados demonstraram que a tipologia construtiva exerce influência direta sobre os modos de falha predominantes. Na Barragem C1, os cenários avaliados estiveram associados à instabilização da fundação e à falha estrutural no maciço de concreto. Já na Barragem T1, os riscos analisados envolveram instabilização do maciço e galgamento, refletindo o comportamento geotécnico e hidráulico típico de estruturas de aterro.

Conclui-se que a metodologia FMEA foi adequada para organizar e comparar os cenários de risco, pois permitiu relacionar componentes, solicitações, causas potenciais, efeitos, controles existentes e notas de criticidade. Além disso, a consideração dos efeitos intermediários possibilitou avaliar a capacidade de detecção e resposta antes da evolução para ruptura. Como limitação, destaca-se que o estudo foi desenvolvido com base em estruturas hipotéticas, recomendando-se, para trabalhos futuros, a aplicação da metodologia com dados reais e detalhados de instrumentação, inspeções, estudos geotécnicos, hidráulicos e operacionais.

6. PALAVRAS-CHAVE

Análise de Risco, Segurança de Barragens, FMEA.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G.; FOSTER, M. (2015) – “Geotechnical Engineering of Dams”, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, ISBN 9781138000087.

[2] ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (2025) – “Relatório de Segurança de Barragens 2024–2025”, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Brasília, Brasil.

[3] USACE – U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1995) – “Gravity Dam Design”, Engineer Manual EM 1110-2-2200, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, Estados Unidos.

[4] GLOBAL TAILINGS REVIEW (2020) – “Global Industry Standard on Tailings Management”, International Council on Mining and Metals, United Nations Environment Programme e Principles for Responsible Investment, Londres, Reino Unido.

[5] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2018) – “ABNT NBR ISO 31000:2018 – Gestão de riscos: Diretrizes”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

[6] ROBERTSON, A. MacG.; SHAW, S. (2003) – “Risk Management for Major Geotechnical Structures on Mines”, Proceedings of Computer Applications in the Mineral Industries – CAMI, Calgary, Alberta, Canadá.

 FOTO 3x4	**Ingrid VIANA** Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e pós-graduada em Engenharia de Barragens pela PUC Minas. Atua na área geotécnica, com experiência em projetos, análises de estabilidade e percolação, instrumentação, ensaios geotécnicos de campo e laboratório, governança geotécnica e gestão de riscos de estruturas geotécnicas.
 FOTO 3x4	**Ana Caroline ÁGUIDO** Engenheira Ambiental (UFMG, 2016) e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG, 2022). Engenheira Sênior na GWS Engenharia atuando nas áreas de Hidrologia, Hidráulica, Segurança de Barragens, Estudos de Ruptura Hipotética, Projetos, Análises de risco em diferentes metodologias, governança geotécnica e conformidade com o GISTM. Possui passagens pelas empresas Pimenta de Ávila e Tetra Tech.
 FOTO 3x4	**Lucas BRASIL** A Engenheiro Civil (UFMG, 2002) e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG, 2005). Sócio-diretor da GWS Engenharia e professor da PUC-MG. Com passagens pela CEMIG, Pimenta de Ávila e Vale, tem experiência em Hidrologia, Hidráulica, Segurança de Barragens e Estudos de Ruptura Hipotética. Publicou trabalhos técnicos no Brasil e no exterior e integra o CBDB e a ASDSO

 FOTO 3x4	**Camila CHAVES** Engenheira Ambiental e Sanitarista (UGB, 2014) e Mestre em Engenharia de Biosistemas (UFF, 2023). Engenheira na GWS Engenharia atuando nas áreas de Hidrologia, Hidráulica, Segurança de Barragens, Estudos de Ruptura Hipotética, Projetos, Análises de risco em diferentes metodologias, governança geotécnica e conformidade com o GISTM. Possui passagens pelas empresas Walm e GhT.
 FOTO 3x4	**Mariana da COSTA** Engenheira Civil (UFOP, 2021) e pós-graduada em Engenharia de Barragens (PUC Minas, 2023). Desde 2020 na GWS Engenharia na área de geotecnia. Atua com análises de risco em diferentes metodologias, PGRBM, governança geotécnica, segurança de estruturas geotécnicas e conformidade com o GISTM.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

CLASSIFICAÇÃO DE RISCOS EM BARRAGEM DE TERRA PELAS METODOLOGIAS BOW-TIE E FMEA

Ingrid VIANA
GWS Engenharia

Ana Caroline ÁGUIDO
GWS Engenharia

Lucas BRASIL
GWS Engenharia

Camila CHAVES
GWS Engenharia

Mariana da COSTA
GWS Engenharia

RESUMO

A análise de riscos em barragens de terra é fundamental para a gestão da segurança dessas estruturas, especialmente diante de mecanismos associados à erosão interna, instabilidade de taludes, galgamento e liquefação. Este artigo tem como objetivo aplicar e comparar as metodologias Bow-Tie e *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) na avaliação qualitativa de riscos em uma barragem de terra hipotética destinada à contenção de rejeitos de mineração. Para isso, foram selecionados quatro cenários representativos, sendo um risco associado a cada modo de falha avaliado. Os cenários foram estruturados conforme os critérios específicos de cada metodologia, considerando causas, efeitos, consequências e controles associados. Os resultados indicaram diferenças no enquadramento da criticidade entre as abordagens. O Bow-Tie apresentou tendência mais conservadora, pois considerou a ruptura da barragem como evento topo. Já a FMEA permitiu avaliar os riscos a partir dos efeitos observáveis pelos controles existentes, considerando sinais precursores e estágios intermediários antes da eventual evolução para ruptura. Conclui-se que as metodologias são complementares e que a escolha do método influencia a priorização das ações de gestão de riscos, devendo considerar o contexto do empreendimento, os objetivos da análise, a disponibilidade de dados e o nível de detalhamento desejado.

ABSTRACT

Risk analysis in earth dams is essential for the safety management of these structures, especially considering failure mechanisms associated with internal erosion, slope instability, overtopping, and liquefaction. This article aims to apply and

compare the Bow-Tie and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) methodologies in the qualitative risk assessment of a hypothetical earth dam designed for mining tailings containment. For this purpose, four representative scenarios were selected, with one risk associated with each evaluated failure mode. The scenarios were structured according to the specific criteria of each methodology, considering associated causes, effects, consequences, and controls. The results indicated differences in the criticality classification between the approaches. The Bow-Tie methodology showed a more conservative tendency, as it considered dam failure as the top event. In contrast, FMEA allowed risks to be assessed based on the observable effects identified by existing controls, considering precursor signs and intermediate stages before a possible progression to failure. It is concluded that the methodologies are complementary and that the choice of method influences the prioritization of risk management actions, which should consider the context of the project, the objectives of the analysis, data availability, and the desired level of detail.

1. INTRODUÇÃO

As barragens de terra são estruturas geotécnicas amplamente utilizadas em empreendimentos de mineração, principalmente para contenção de rejeitos, sedimentos e água de processo. Embora desempenhem papel essencial na operação desses empreendimentos, seu comportamento depende da interação entre fatores geotécnicos, hidráulicos, hidrológicos, construtivos e operacionais, exigindo controle técnico contínuo ao longo de sua vida útil.

No contexto da mineração, a segurança de barragens assume relevância ainda maior em razão do potencial de dano associado a uma eventual falha. Dependendo do volume armazenado, da natureza do material contido, da ocupação a jusante e das características do ambiente receptor, a ruptura de uma barragem pode produzir consequências severas, incluindo perdas humanas, impactos ambientais, danos à infraestrutura e prejuízos econômicos expressivos.

Nesse cenário a análise de riscos é uma ferramenta essencial para a gestão da segurança, pois permite identificar cenários de falha, compreender suas causas, avaliar seus efeitos e apoiar a definição de medidas de prevenção, monitoramento, controle e mitigação.

Em barragens de terra, mecanismos como erosão interna, instabilidade de taludes, galgamento e liquefação são frequentemente considerados em avaliações de segurança, por apresentarem potencial de comprometer o desempenho da estrutura. No entanto, o enquadramento da criticidade desses riscos pode variar conforme a metodologia adotada, os critérios utilizados e a forma como as consequências são consideradas.

Dentre as metodologias mais empregadas, destacam-se o Bow-Tie e a *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). O Bow-Tie permite organizar o risco a partir da relação entre causas, evento principal, consequências e barreiras preventivas e mitigadoras. A FMEA, por sua vez, estrutura a análise em formato matricial, relacionando modos de falha, causas, efeitos, controles e critérios de criticidade.

Diante disso, este artigo tem como objetivo aplicar e comparar as metodologias Bow-Tie e FMEA na avaliação qualitativa de riscos em uma barragem de terra hipotética, denominada Barragem B1. Para isso, foram selecionados quatro cenários representativos, sendo um risco associado a cada modo de falha avaliado: galgamento, erosão interna, instabilidade de taludes e liquefação.

O estudo possui finalidade acadêmica e metodológica, não correspondendo à avaliação oficial de segurança de uma estrutura real específica. A comparação proposta busca demonstrar como a escolha da metodologia pode influenciar o enquadramento da criticidade e, consequentemente, a priorização das ações de gestão de riscos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Barragens de terra

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) [2], barragens são estruturas destinadas à contenção ou acumulação de água, líquidos ou misturas de líquidos e sólidos, formando reservatórios voltados a diferentes finalidades. Essas estruturas podem ser implantadas tanto em cursos d'água quanto em áreas externas a eles, sendo, em geral, dispostas transversalmente ao sentido natural do escoamento. Entre suas principais aplicações, destacam-se a geração de energia elétrica, a regularização de cheias, o abastecimento, a contenção de sedimentos e a disposição de rejeitos de mineração, conforme [2].

No Brasil, conforme dados da [2], existem 28.085 barragens cadastradas. Dentre as tipologias registradas, as barragens de terra homogênea ou de terra zoneada representam a maior parcela, correspondendo a aproximadamente 56% do total. Essa predominância pode ser associada, entre outros fatores, às características topográficas do território brasileiro, marcado pela presença de vales mais abertos, bem como à disponibilidade de materiais terrosos adequados para a construção dessas estruturas [2].

O desempenho das barragens de terra está diretamente relacionado às propriedades dos materiais empregados, às condições de fundação, à qualidade do projeto, ao método construtivo, ao controle de compactação, à eficiência dos sistemas de drenagem e às práticas de operação e manutenção. Entretanto, ainda que sejam projetadas e executadas conforme critérios técnicos e boas práticas de engenharia, essas estruturas possuem riscos inerentes ao seu funcionamento. Nesse sentido, conforme Santos [3], mesmo quando projetadas e executadas conforme os regulamentos técnicos e o estado da arte da engenharia, essas estruturas apresentam riscos inerentes, os quais devem ser analisados, avaliados e geridos por meio de análises de risco.

2.2 Segurança de barragens e análise de riscos

A Lei nº 12.334/2010 [4] define segurança de barragem como a condição destinada à manutenção da integridade estrutural e operacional da estrutura, visando à preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente. O GISTM (2020) [5] reforça que as estruturas de disposição de rejeitos devem ser concebidas, operadas e monitoradas com foco na prevenção de falhas catastróficas, estabelecendo como princípio a tolerância zero para fatalidades humanas e a busca por danos nulos às pessoas e ao meio ambiente.

Dessa forma, conforme proposto pelo [5], segurança de barragens não deve ser compreendida apenas como estabilidade física da estrutura, mas como um processo integrado, que envolve base de conhecimento, critérios adequados de projeto, construção, operação, monitoramento, governança, gestão de riscos, preparação para emergências, recuperação de longo prazo, divulgação pública e acesso à informação.

Ainda conforme o [5], a segurança de barragens deve ser tratada como um processo contínuo, abrangendo todas as fases do ciclo de vida da estrutura, desde a concepção, projeto e construção até a operação, fechamento e pós-fechamento. Ao longo desse processo, inspeções, monitoramento, manutenção e revisões periódicas são fundamentais para identificar alterações no comportamento da estrutura, uma vez

que essas mudanças podem indicar o desenvolvimento de mecanismos associados a possíveis modos de falha.

Nesse contexto, a análise de riscos constitui uma ferramenta essencial para a gestão da segurança de barragens. De modo geral, pode ser compreendida como um processo sistemático que utiliza as informações disponíveis para identificar, compreender e estimar riscos associados a pessoas, bens, ao meio ambiente e à própria integridade da estrutura. Esse processo envolve o reconhecimento dos eventos indesejáveis, a avaliação dos mecanismos que podem conduzir à sua ocorrência e a estimativa da probabilidade e da magnitude das consequências associadas.

No caso de barragens de terra, a análise de riscos permite avaliar cenários hipotéticos de ruptura ou perda de desempenho, considerando possíveis modos de falha, como erosão interna, instabilidade de taludes, galgamento e liquefação. A partir dessa abordagem, é possível identificar as causas potenciais, os eventos iniciadores, os mecanismos de evolução e os efeitos associados a cada cenário, subsidiando a definição de medidas de controle, monitoramento e tratamento dos riscos.

A Resolução ANM nº 220/2025 [6] estabelece que a gestão da segurança de barragens de mineração deve contemplar o Processo de Gestão de Riscos para Barragens de Mineração (PGRBM), obrigatório para estruturas com DPA ≥ 4 ou DPA alto. Esse processo deve incluir a identificação, análise, avaliação e classificação dos riscos associados à segurança da barragem, utilizando metodologias reconhecidas nacional e internacionalmente. Além disso, os riscos devem ser classificados em níveis compatíveis com critérios previamente definidos, podendo ser enquadrados como aceitáveis, ALARP ou não aceitáveis.

De forma complementar, o [5] recomenda que as avaliações de risco sejam realizadas e atualizadas por equipe multidisciplinar qualificada, utilizando metodologias baseadas em boas práticas reconhecidas.

A ABNT NBR ISO 31000:2018 [7], estabelece que o processo de gestão de riscos deve iniciar pela definição do contexto da análise, considerando fatores internos e externos que possam influenciar a avaliação. A norma também orienta que sejam contempladas as etapas de identificação, análise, avaliação e tratamento dos riscos, além do monitoramento, análise crítica, comunicação e consulta ao longo de todo o processo.

O processo de gestão de riscos também deve contemplar o monitoramento e a análise crítica, de modo a acompanhar a eficácia das medidas adotadas e identificar eventuais alterações no desempenho esperado da estrutura. Além disso, a comunicação e a consulta com as partes interessadas devem ocorrer de forma contínua, assegurando transparência, troca de informações e participação adequada ao longo de todo o processo.

Assim, no âmbito da segurança de barragens de terra aplicadas à mineração, a gestão de riscos representa um instrumento fundamental para apoiar a tomada de decisão técnica, orientar ações de monitoramento e controle, priorizar intervenções e reduzir a possibilidade de ocorrência de eventos indesejáveis. Dessa forma, metodologias

estruturadas de análise, como FMEA e Bow-Tie, podem contribuir para a identificação dos principais modos de falha, suas causas, consequências e barreiras de controle, fortalecendo a gestão preventiva da segurança dessas estruturas.

2.3 Metodologia FMEA

A Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) é uma metodologia estruturada de análise de riscos utilizada para identificar modos de falha potenciais, suas causas, efeitos e controles existentes. Segundo Robertson e Shaw [8], o risco na FMEA resulta da combinação entre a probabilidade de ocorrência da falha e a severidade de suas consequências, podendo ser aplicado a estruturas geotécnicas, equipamentos, processos e sistemas de mineração.

No contexto de estruturas geotécnicas em mineração, os autores destacam que as consequências de uma falha podem ser avaliadas em diferentes dimensões, incluindo impactos econômicos, ambientais, regulatórios, de saúde e segurança, além de aspectos relacionados à preocupação pública e imagem institucional. Essa abordagem amplia a análise para além do desempenho físico da estrutura, incorporando também seus possíveis desdobramentos humanos, ambientais, legais e reputacionais.

2.4 Metodologia Bow-Tie

Conforme Chew et al. [9] a metodologia Bow-Tie é uma ferramenta qualitativa de análise de riscos que representa a relação entre ameaças, evento topo, consequências e barreiras de controle. As ameaças são posicionadas à esquerda do diagrama, o evento topo ao centro e as consequências à direita, permitindo visualizar a trajetória de evolução do risco.

Segundo [9], o Bow-Tie é uma abordagem baseada em barreiras, na qual os controles preventivos buscam impedir que as ameaças evoluam até o evento topo, enquanto os controles de recuperação ou mitigação atuam para limitar a progressão do evento para consequências mais severas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste estudo foi estruturada para aplicar e comparar as técnicas FMEA e Bow-Tie na análise de riscos de uma barragem hipotética, denominada Barragem B1. A estrutura foi baseada em informações públicas de uma barragem de mineração real, porém os resultados e interpretações apresentados possuem finalidade exclusivamente acadêmica.

O procedimento metodológico foi dividido em seis etapas: caracterização da estrutura hipotética; definição dos modos de falha; definição dos componentes, causas potenciais e efeitos; construção das matrizes de apoio; aplicação das metodologias FMEA e Bow-Tie; e comparação dos resultados obtidos. A Figura 1 apresenta o fluxograma simplificado das etapas metodológicas desenvolvidas.

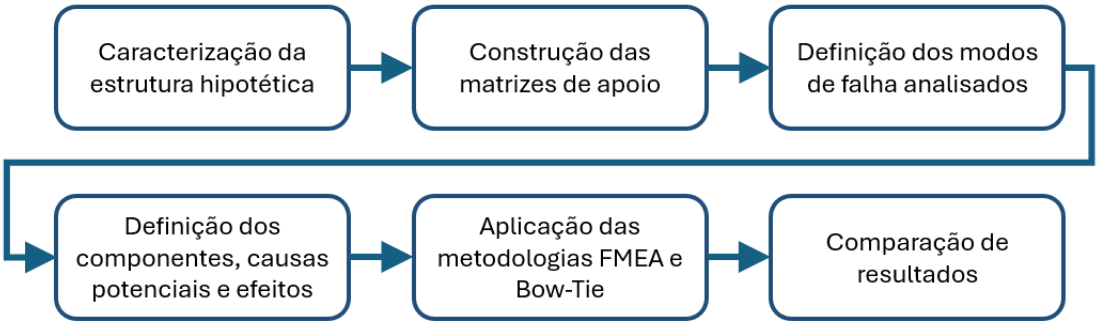


Figura 1 – Fluxograma para definição dos materiais e métodos.

3.1 Caracterização da estrutura hipotética

Para fins de aplicação das metodologias propostas, foi considerado um cenário hipotético de uma barragem de terra inserida em um empreendimento minerário, denominada neste artigo como Barragem B1. A estrutura foi concebida como uma barragem destinada à contenção de rejeitos de minério de ferro, construída em etapa única e associada a estruturas auxiliares de fechamento.

A Barragem B1 foi definida com base em características típicas de estruturas de mineração de grande porte, contemplando maciço principal, reservatório, sistema extravasor, sistema de drenagem interna, instrumentos de monitoramento geotécnico e áreas potencialmente afetadas a jusante. Para fins de análise, considerou-se que a estrutura possui Dano Potencial Associado alto, em razão das possíveis consequências sociais, ambientais e econômicas decorrentes de uma eventual falha.

O sistema de monitoramento foi considerado composto por instrumentos voltados ao acompanhamento das condições hidráulicas e geotécnicas da estrutura, incluindo piezômetros, indicadores de nível d'água, medidores de vazão, medidor de nível do reservatório, pluviômetro, inclinômetros, tiltímetros, prismas ópticos e estação robótica. Esses instrumentos permitem acompanhar variações de poropressão, níveis internos de água, vazões drenadas, deslocamentos e deformações.

3.2 Construção das matrizes de apoio

Em seguida, foram construídas as matrizes de apoio utilizadas para a classificação dos riscos. Essas matrizes foram elaboradas especificamente para este estudo, com o objetivo de padronizar a atribuição das notas de probabilidade, impacto e detecção/controle.

A classificação dos riscos foi realizada com base nos critérios de probabilidade, impacto e detecção/controle, aplicados tanto na metodologia FMEA quanto na metodologia Bow-Tie. A probabilidade variou de L1 a L6 (quase impossível a frequente ou iminente), enquanto o impacto variou de C1 a C6 (insignificante a muito crítico), contemplando as dimensões de saúde e segurança, financeiro, ambiental, reputacional, legal/regulatório e social/comunidade. A detecção/controle variou de D1 a D6 (detecção praticamente certa a ausência de detecção confiável), considerando a capacidade dos controles existentes de identificar o risco ou seus sinais precursores antes da evolução para estágios mais críticos.

Entre a Tabela 1 e a Tabela 2 são apresentaras, respectivamente, os critérios adotados para a classificação da probabilidade, dos controles e dos impactos.

Tabela 1– Critérios de Classificação da Probabilidade.

Classificação	Nota	Descrição resumida
L1 Quase impossível	1	Modo de falha tecnicamente possível, porém extremamente remoto nas condições atuais de projeto, operação e monitoramento. Sem histórico conhecido na estrutura e sem deficiência física relevante. Frequência indicativa: **< 10^{-5}/ano**, equivalente a ocorrência inferior a 1 vez a cada **100.000 anos**.
L2 Remoto	2	Evento pouco esperado, cuja ocorrência dependeria da combinação excepcional de fatores adversos e da perda simultânea de controles preventivos. As condições atuais da estrutura não indicam tendência de desenvolvimento do modo de falha, embora o cenário permaneça tecnicamente possível. Frequência indicativa: **≥ 10^{-5} e < 10^{-4}/ano**, equivalente a ocorrência entre 1 vez a cada **100.000 anos** e 1 vez a cada **10.000 anos**.
L3 Improvável, mas possível	3	Evento não esperado em operação normal, mas possível diante de condição anômala, falha pontual ou degradação localizada. Pode haver histórico de eventos iniciadores, mas sem falha relevante dos controles preventivos. Deficiência física inexistente ou pouco significativa. Frequência indicativa: **≥ 10^{-4} e < 10^{-3}/ano**, equivalente a ocorrência entre 1 vez a cada **10.000 anos** e 1 vez a cada **1.000 anos**.
L4 Provável	4	Modo de falha plausível ao longo da vida útil, especialmente com perda de desempenho, manutenção insuficiente ou controles limitados. Pode haver presença isolada e/ou combinada de um ou mais dos seguintes critérios: deficiência física significativa, histórico de eventos iniciadores e/ou evidência indireta de progressão do modo de falha. Frequência indicativa: **≥ 10^{-3} e < 10^{-2}/ano**, equivalente a ocorrência entre 1 vez a cada **1.000 anos** e 1 vez a cada **100 anos**.
L5 Muito provável	5	Evento com elevada possibilidade de ocorrência caso não sejam adotadas medidas corretivas ou de mitigação. Pode haver presença isolada e/ou combinada de um ou mais dos seguintes critérios: histórico de ocorrência, degradação relevante, falha frequente de controles e/ou evidência direta de progressão do modo de falha. Frequência indicativa: **≥ 10^{-2} e < 10^{-1}/ano**, equivalente a ocorrência entre 1 vez a cada **100 anos** e 1 vez a cada **10 anos**.
L6 Frequente ou iminente	6	Cenário recorrente, em progressão evidente ou próximo de se materializar sem intervenção imediata. Pode haver presença isolada e/ou combinada de um ou mais dos seguintes critérios: controles inexistentes, ineficazes ou já superados, condição crítica observada em campo e/ou evento com tendência de recorrência. Frequência indicativa: **≥ 10^{-1}/ano**, equivalente a ocorrência igual ou superior a 1 vez a cada **10 anos**, ou condição iminente.

Salienta-se que a frequência indicativa anual deve ser entendida como referência para apoio à classificação da probabilidade. A atribuição da nota deve considerar a presença isolada e/ou combinada dos critérios descritos em cada categoria, sempre mediante julgamento técnico fundamentado. A existência de um único critério não implica, automaticamente, o enquadramento na respectiva nota, devendo ser avaliada sua relevância, intensidade, persistência e relação com o modo de falha analisado.

Tabela 2– Critérios de classificação dos Controles.

Classificação	Nota	Descrição
D1 - Detecção praticamente certa	1	Os controles existentes apresentam efetividade muito elevada para identificar antecipadamente o modo de falha ou seus sinais precursores, permitindo atuação preventiva antes da manifestação de consequências relevantes.
D2 - Alta probabilidade de detecção	2	Há alta probabilidade de identificação antecipada do modo de falha, com controles suficientemente eficazes para permitir análise e resposta em tempo adequado.
D3 - Detecção parcial	3	A detecção do modo de falha é possível, porém parcial, dependendo da regularidade dos controles, da qualidade das informações disponíveis e da interpretação técnica das evidências observadas.
D4 - Baixa eficácia de detecção	4	Os controles existentes apresentam baixa eficácia para identificar antecipadamente o modo de falha, podendo a detecção ocorrer apenas quando os sinais já estiverem evidentes.
D5 - Detecção pouco provável	5	A identificação antecipada do modo de falha é pouco provável antes da manifestação dos efeitos associados, indicando limitações relevantes na capacidade de detecção dos controles existentes.
D6 - Ausência de detecção confiável	6	Não há detecção confiável do modo de falha ou de seus sinais precursores. A condição tende a ser reconhecida apenas após a manifestação das consequências, tornando a resposta predominantemente reativa.

Tabela 3– Critérios de Classificação dos Impactos.

Classificação	Nota	Pessoas	Financeiro	Meio Ambiente	Reputacional	Legal e Regulatória	Social e Comunidade
C1 - Insignificante	1	Sem ferimentos ou eventos restritos a primeiros socorros, sem afastamento ou sequela.	**< R$ 100.000**	Impacto pontual, de baixa magnitude, plenamente reversível, sem perda de integridade ambiental e controlável com medidas simples.	Repercussão restrita ao ambiente interno, sem envolvimento relevante de comunidade, imprensa ou partes externas.	Sem descumprimento legal ou das normas internas da empresa.	Sem impacto social, cultural ou comunitário relevante, sem alteração perceptível em bens, serviços ou modos de vida.
C2 - Leve	2	Casos com necessidade de atendimento médico, sem incapacidade permanente e com recuperação esperada.	**R$ 100.000 a R$ 1.000.000**	Impacto localizado, de baixa magnitude, com recuperação em curto prazo e necessidade de medidas simples de controle ou correção. A integridade do ambiente afetado é restabelecida em até 1 semana após a ocorrência do evento.	Reclamações pontuais ou preocupação restrita a comunidade local, com baixo engajamento de partes interessadas e sem exposição significativa.	Não conformidade ou desvio controlável internamente, sem sanção significativa ou judicialização.	Impacto localizado, reversível e de baixa magnitude sobre pessoas, bens, atividades locais ou rotinas comunitárias.
C3 - Moderado	3	Lesão ou condição com incapacidade temporária, afastamento.	**R$ 1.000.000 a R$ 10.000.000**	Impacto de média magnitude, com abrangência local, necessidade de ação corretiva estruturada e acompanhamento. A integridade do ambiente afetado é restabelecida em de 1 semana até 4 anos após a ocorrência do evento.	Reclamações recorrentes, questionamentos comunitários, manifestações pontuais ou atenção local da mídia, exigindo resposta institucional organizada.	Questão legal ou regulatória com necessidade de correção formal, registro, resposta estruturada ou acompanhamento junto a partes interessadas.	Impacto social local, temporário ou de médio prazo, com interferência em atividades, serviços, bens ou modos de vida, porém com reparação viável.
C4 - Significativo	4	Lesão grave, deficiência permanente ou comprometimento funcional importante.	**R$ 10.000.000 a R$ 100.000.000**	Impacto significativo, com perda funcional relevante, abrangência ampliada, recuperação prolongada e necessidade de reparação, compensação ou monitoramento continuado. A integridade do ambiente afetado é restabelecida em de 1 semana até 8 anos após a ocorrência do evento.	Mobilização comunitária relevante, atenção concentrada da mídia regional ou envolvimento de autoridades, lideranças e partes interessadas externas.	Violação relevante, com possibilidade de autuação, notificação, reporte formal, condicionantes adicionais ou atuação de autoridade competente.	Danos relevantes e persistentes a comunidades, modos de vida, atividades econômicas, bens culturais ou serviços locais, exigindo plano estruturado de resposta.
C5 - Crítico	5	Múltiplas incapacidades, doença ocupacional grave, lesões severas.	**R$ 100.000.000 a R$ 1.000.000.000**	Impacto ambiental grave, extenso ou de difícil reversão, com alteração importante da integridade ambiental, necessidade de reparação complexa e mobilização de recursos internos e externos. A integridade do ambiente afetado é restabelecida em de 8 anos até 12 anos após a ocorrência do evento.	Repercussão nacional, com forte pressão de comunidades, mídia, órgãos públicos, investidores, organizações sociais ou movimentos coletivos.	Violação regulatória grave, com possibilidade de ação judicial significativa, sanções relevantes, restrições operacionais ou obrigações corretivas extensas.	Impactos sociais persistentes e extensos, com danos relevantes a comunidades, bens culturais, modos de vida, atividades econômicas ou serviços essenciais.
C6 - Muito Crítico	6	Uma ou mais fatalidades.	**> R$ 1.000.000.000**	Impacto ambiental catastrófico, com comprometimento severo de funções ecológicas, perda de integridade ambiental, recuperação incerta ou não restabelecimento em horizonte previsível. A integridade do ambiente afetado é restabelecida após 12 anos após a ocorrência do evento.	Crise reputacional ampla, com clamor público intenso, repercussão internacional, campanhas de grande alcance ou perda severa de confiança institucional.	Multas significativas, suspensão ou perda de licenças, paralisação relevante, intervenção externa ou perda do direito de operar.	Impacto social extremo, generalizado e de longa duração, com deslocamentos, ruptura de modos de vida, danos severos a comunidades, perda de referências culturais ou comprometimento de direitos fundamentais.

3.3 Definição dos modos de falha avaliados

Após a construção das matrizes de apoio, foram definidos os modos de falha a serem avaliados no estudo. Foram considerados quatro modos de falha para aplicação e comparação das metodologias, descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Descrição dos modos de falha considerados no estudo

Modo de falha	Descrição
Erosão interna	Carreamento progressivo de partículas pelo fluxo de percolação no maciço, fundação ou interfaces.
Instabilidade de taludes	Perda de estabilidade do talude de montante ou jusante, associada à redução da resistência ou aumento das solicitações.
Galgamento	Elevação do nível do reservatório até atingir ou ultrapassar a crista da barragem.
Liquefação	Perda significativa de resistência de materiais saturados, podendo gerar deformações excessivas ou ruptura.

3.4 Definição dos componentes, causas potenciais e efeitos

Para cada modo de falha analisado, foram definidos o componente associado, a solicitação atuante, a causa potencial e os efeitos potenciais. Essa organização permitiu compreender a sequência do risco, desde a condição inicial até suas possíveis consequências.

O componente corresponde ao elemento físico ou funcional da barragem relacionado ao modo de falha. A solicitação representa a condição externa que atua sobre a estrutura, como chuva intensa ou sismo natural. Já a causa potencial se refere à condição ou deficiência que pode iniciar ou favorecer o desenvolvimento do modo de falha.

Os efeitos potenciais foram divididos em três níveis: locais, intermediários e finais. Os efeitos locais representam os primeiros sinais observáveis do mecanismo; os intermediários indicam a possível evolução do processo caso os controles não sejam suficientes; e os finais correspondem às consequências mais severas, como a ruptura da barragem e a formação da onda de inundação.

3.5 Aplicação da metodologia FMEA e Bow-Tie

A metodologia FMEA permite avaliar o modo de falha considerando a maturidade dos controles existentes e sua capacidade de detectar ou interromper a evolução do mecanismo. Assim, o impacto pode ser classificado no estágio em que se entende que o risco seria identificado ou controlado, antes de atingir consequências mais severas.

Nos cenários de galgamento, erosão interna e instabilização, verificou-se que os controles disponíveis permitem a identificação do processo ainda no primeiro estágio de efeito observável. Dessa forma, a classificação do impacto foi realizada com base nesses efeitos iniciais. Para o modo de falha por liquefação, a avaliação considerou o estágio final, devido à dificuldade de detecção dos efeitos iniciais e à possibilidade de evolução rápida do mecanismo.

Já a metodologia Bow-Tie foi aplicada conforme sua lógica metodológica, estruturada a partir do evento topo. Nessa abordagem, são relacionados as ameaças, os controles preventivos, o evento topo, os controles mitigatórios e as consequências potenciais.

Por avaliar o evento topo e suas consequências, a metodologia Bow-Tie tende a representar cenários de maior severidade. Assim, as notas de impacto podem ser mais elevadas em relação à metodologia FMEA, pois consideram o evento crítico e não o estágio em que o mecanismo poderia ser previamente detectado ou controlado.

3.6 Critério de comparação dos resultados

Após a aplicação das duas metodologias, os resultados foram comparados com o objetivo de avaliar as diferenças entre as classificações obtidas pela FMEA e pelo Bow-Tie. A comparação considerou principalmente o estágio da cadeia de falha utilizado para a atribuição das notas de impacto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estruturação dos cenários de risco

A estruturação dos cenários foi realizada a partir da seleção de um risco representativo para cada modo de falha avaliado. Para cada cenário, foram definidos o componente associado, a solicitação, a causa potencial e a sequência de efeitos esperados, desde os efeitos locais até os efeitos finais.

No galgamento, avaliou-se a obstrução parcial do emboque do sistema extravasor durante evento pluviométrico, podendo gerar redução da capacidade de descarga, elevação do nível d'água, erosões no extravasor ou nos taludes, galgamento e, em condição extrema, ruptura da barragem.

Na erosão interna, considerou-se a redução do desempenho do sistema de drenagem interna, incluindo filtro inclinado e tapete drenante. Esse cenário pode provocar alteração de vazão, mudança de cor ou turbidez do efluente, variação de poropressões, surgências d'água, rupturas localizadas e eventual ruptura da estrutura.

Para a instabilização, foi considerada a ocorrência de sismos naturais em materiais com baixa resistência no maciço e na fundação. Os efeitos previstos incluem abatimentos, redução do fator de segurança, formação de superfície crítica de ruptura, ruptura localizada e possível ruptura global.

Na liquefação, avaliou-se a presença de materiais suscetíveis sob gatilho estático, com possibilidade de deformações no maciço, redução da resistência ao cisalhamento, ruptura da fundação, ruptura dos taludes, deslizamentos e ruptura da barragem. Esses cenários serviram de base para a aplicação das metodologias FMEA e Bow-Tie e para a comparação dos enquadramentos de criticidade obtidos.

4.2 Resultado da aplicação da FMEA

A Figura 2 apresenta o enquadramento dos cenários na matriz de riscos da metodologia FMEA. Adicionalmente, a Figura 3 apresenta a síntese dos riscos avaliados, com as respectivas notas de probabilidade, impacto, detecção/controle e criticidade obtida. Observa-se que os cenários de galgamento, erosão interna e instabilização foram classificados em faixas de menor criticidade, enquanto o cenário de liquefação apresentou enquadramento mais elevado.

Para o cenário de galgamento, a probabilidade foi classificada como L1 – Quase impossível, enquanto o impacto foi enquadrado como C2 – Menor. Esse resultado

está associado à existência de controles capazes de identificar o problema ainda em estágio inicial, como inspeções, acompanhamento do nível d'água e verificação das condições operacionais do sistema extravasor. Dessa forma, a análise considerou que o mecanismo poderia ser detectado antes de evoluir para consequências mais severas.

No cenário de erosão interna, também foi atribuída probabilidade L1 – Quase impossível e impacto C2 – Menor. A classificação se justifica pela presença de controles relacionados ao monitoramento da drenagem interna, inspeções visuais, acompanhamento de vazões, turbidez e leituras piezométricas. Esses elementos permitem identificar alterações ainda nos primeiros efeitos observáveis do mecanismo. Para a instabilização, o cenário foi enquadrado com probabilidade L1 – Quase impossível e impacto C3 – Moderada. Embora a ocorrência de sismos naturais com capacidade de gerar instabilidade seja considerada pouco provável, os efeitos associados à perda de estabilidade podem apresentar maior relevância em relação aos cenários anteriores. Por isso, o impacto foi classificado em nível superior, ainda que dentro de uma faixa controlável pela metodologia FMEA.

O cenário de liquefação apresentou probabilidade L1 – Quase impossível e impacto C6 – Extrema. Diferentemente dos demais modos de falha, esse mecanismo apresenta maior limitação quanto à detecção confiável dos efeitos iniciais e pode evoluir rapidamente para perda de resistência e deformações significativas. Por esse motivo, a classificação do impacto considerou o estágio final do mecanismo.

Dessa forma, a metodologia FMEA resultou em três cenários enquadrados como aceitáveis e um cenário enquadrado como tolerável, evidenciando que, para a maior parte dos modos de falha avaliados, os controles existentes contribuem para a identificação do risco em estágios iniciais.

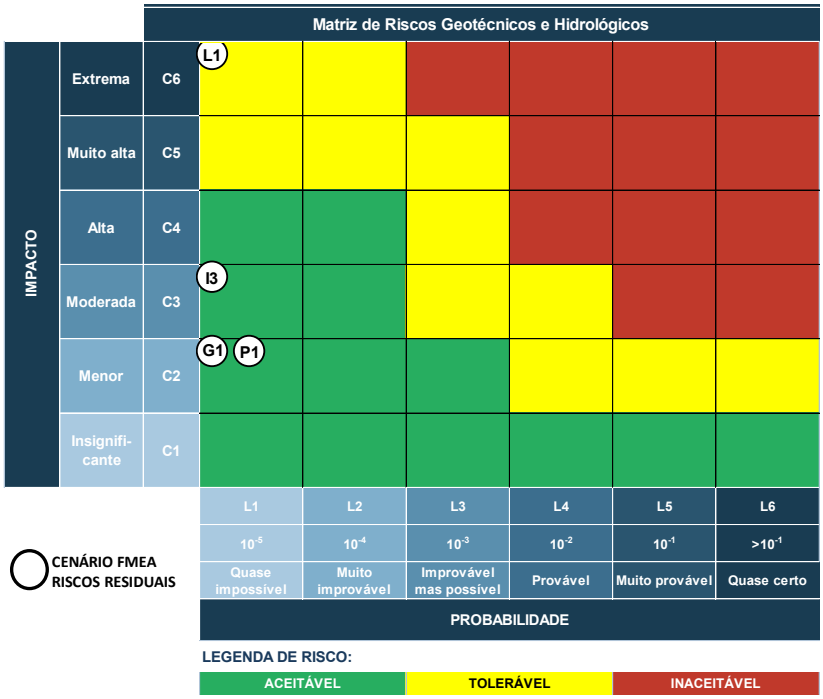
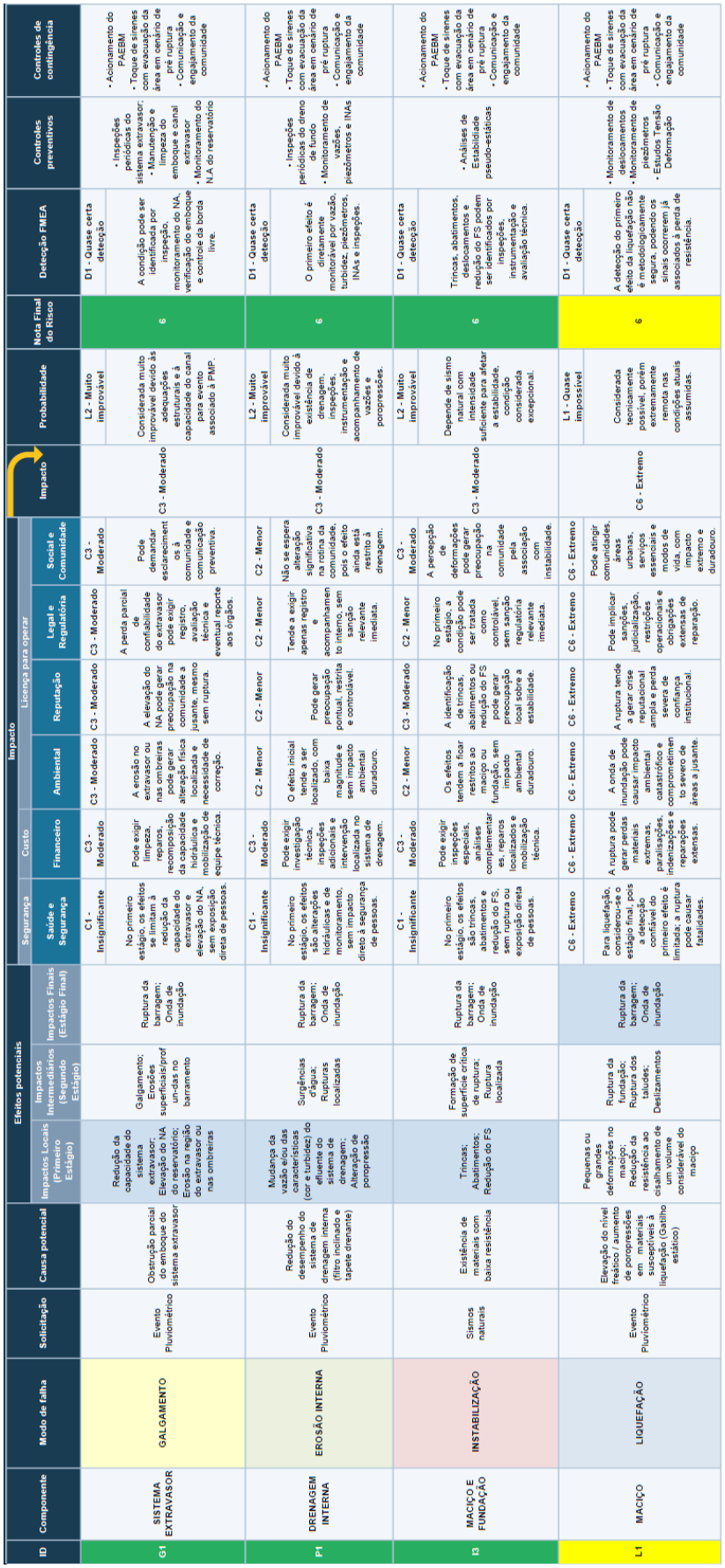


Figura 2 – Matriz de Riscos - FMEA.



ID	Componente	Modo de falha	Solicitação	Causa potencial	Efeitos potenciais			Impacto							Impacto	Probabilidade	Nota Final do Risco	Detecção FMEA	Controles preventivos	Controles de contingência
					Impactos Locais (Primeiro Estágio)	Impactos Intermediários (Segundo Estágio)	Impactos Finais (Estágio Final)	Segurança	Custo		Licença para operar									
								Saúde e Segurança	Financeiro	Ambiental	Reputação	Legal e Regulatória	Social e Comunidade							
G1	SISTEMA EXTRAVASOR	GALGAMENTO	Evento Pluviométrico	Obstrução parcial do emboque do sistema extravasor	Redução da capacidade do sistema extravasor; Elevação do NA do reservatório; Erosão na região do extravasor ou nas ombreiras	Galgamento; Erosões superficiais/prof un-das no barramento	Ruptura da barragem; Onda de inundação	C1 - Insignificante No primeiro estágio, os efeitos se limitam à redução da capacidade do extravasor e elevação do NA, sem exposição direta de pessoas.	C3 - Moderado Pode exigir limpeza, reparos, recomposição da capacidade hidráulica e mobilização de equipe técnica.	C3 - Moderado A erosão no extravasor ou nas ombreiras pode gerar alteração física localizada e necessidade de correção.	C3 - Moderado A elevação do NA pode gerar preocupação na comunidade a jusante, mesmo sem ruptura.	C3 - Moderado A perda parcial de confiabilidade do extravasor pode exigir registro, avaliação técnica e eventual reporte aos órgãos.	C3 - Moderado Pode demandar esclarecimentos à comunidade e comunicação preventiva.	C3 - Moderado	L2 - Muito improvável Considerada muito improvável devido às adequações estruturais e à capacidade do canal para evento associado à PMP.	6	D1 - Quase certa detecção A condição pode ser identificada por inspeção, monitoramento do NA, verificação do emboque e controle da borda livre.	• Inspeções periódicas do sistema extravasor; • Manutenção e limpeza do emboque e canal extravasor • Monitoramento do N.A do reservatório	• Acionamento do PAEM • Toque de sirenes com evacuação da área em cenário de pré ruptura • Comunicação e engajamento da comunidade
P1	DRENAGEM INTERNA	EROSÃO INTERNA	Evento Pluviométrico	Redução do desempenho do sistema de drenagem interna (filtro inclinado e tapete drenante)	Mudança da vazão e/ou das características (cor e turbidez) do efluente do sistema de drenagem; Alteração de poropressão	Surgências d'agua; Rupturas localizadas	Ruptura da barragem; Onda de inundação	C1 - Insignificante No primeiro estágio, os efeitos são alterações hidráulicas e de monitoramento, sem impacto direto à segurança de pessoas.	C3 - Moderado Pode exigir investigação técnica, inspeções adicionais e intervenção localizada no sistema de drenagem.	C2 - Menor O efeito inicial tende a ser localizado, com baixa magnitude e sem impacto ambiental duradouro.	C2 - Menor Pode gerar preocupação pontual, restrita e controlável.	C2 - Menor Tende a exigir apenas registro e acompanhamento interno, sem sanção relevante imediata.	C2 - Menor Não se espera alteração significativa na rotina da comunidade, pois o efeito ainda está restrito à drenagem.	C3 - Moderado	L2 - Muito improvável Considerada muito improvável devido à existência de drenagem, inspeções, instrumentação e acompanhamento de vazões e poropressões.	6	D1 - Quase certa detecção O primeiro efeito é diretamente monitorável por vazão, turbidez, piezômetros, INAs e inspeções.	• Inspeções periódicas do dreno de fundo • Monitoramento de vazões, piezômetros e INAs	• Acionamento do PAEM • Toque de sirenes com evacuação da área em cenário de pré ruptura • Comunicação e engajamento da comunidade
I3	MACIÇO E FUNDAÇÃO	INSTABILIZAÇÃO	Sismos naturais	Existência de materiais com baixa resistência	Trincas; Abatimentos; Redução do FS	Formação de superfície crítica de ruptura; Ruptura localizada	Ruptura da barragem; Onda de inundação	C1 - Insignificante No primeiro estágio, os efeitos são trincas, abatimentos e redução do FS, sem ruptura ou exposição direta de pessoas.	C3 - Moderado Pode exigir inspeções especiais, ampliação de instrumentos, reparos localizados e mobilização técnica.	C2 - Menor Os efeitos tendem a ficar restritos ao maciço ou fundação, sem impacto ambiental duradouro.	C3 - Moderado A identificação de trincas, abatimentos ou redução do FS pode gerar preocupação local sobre a estabilidade.	C2 - Menor No primeiro estágio, a condição pode ser tratada como controlável, sem sanção regulatória relevante imediata.	C3 - Moderado A percepção de deformações pode gerar preocupação da comunidade pela associação com instabilidade.	C3 - Moderado	Depende de sismo natural com intensidade suficiente para afetar a estabilidade, condição considerada excepcional.	6	D1 - Quase certa detecção Trincas, abatimentos, deslocamentos e reduções no FS podem ser identificados por inspeções, instrumentação e avaliação técnica.	• Análises de Estabilidade pseudo-estáticas	• Acionamento do PAEM • Toque de sirenes com evacuação da área em cenário de pré ruptura • Comunicação e engajamento da comunidade
L1	MACIÇO	LIQUEFAÇÃO	Evento Pluviométrico	Elevação do nível freático / aumento de porepressões em materiais susceptíveis à liquefação (fator sísmico)	Pequenas ou grandes deformações no maciço; Redução da resistência ao cisalhamento de um volume considerável do maciço	Ruptura da fundação; Ruptura dos taludes; Deslizamentos	Ruptura da barragem; Onda de inundação	C6 - Extremo Para liquefação, considerou-se o estágio final, pois a detecção confiável do primeiro efeito é limitada; a ruptura pode causar fatalidades.	C6 - Extremo A ruptura pode gerar perdas materiais extremas, paralisações, indenizações e reparações extensas.	C6 - Extremo A onda de inundação pode causar impacto ambiental catastrófico e comprometimento severo de áreas a jusante.	C6 - Extremo A ruptura tende a gerar crise reputacional ampla e perda severa de confiança institucional.	C6 - Extremo Pode implicar sanções judicialização, restrições operacionais e obrigações extensas de reparação.	C6 - Extremo Pode atingir comunidades, áreas urbanas, serviços essenciais e modos de vida, com impacto extremo e duradouro.	C6 - Extremo	L1 - Quase impossível Considerada tecnicamente possível, porém extremamente remota nas condições atuais assumidas.	6	D1 - Quase certa detecção A detecção do primeiro efeito da liquefação não é metodologicamente segura, podendo os sinais ocorrerem já associados à perda de resistência.	• Monitoramento de deslocamentos • Monitoramento de piezômetros • Estudos Tensão Deformação	• Acionamento do PAEM • Toque de sirenes com evacuação da área em cenário de pré ruptura • Comunicação e engajamento da comunidade

Figura 3 – Notas e riscos avaliados - FMEA

4.3 Resultado da aplicação do Bow-Tie

A Figura 4 apresenta o enquadramento dos cenários na matriz de riscos da metodologia Bow-Tie. Adicionalmente, a Figura 5 e a Figura 6 apresentam a síntese dos riscos avaliados, com as respectivas notas de probabilidade, impacto e criticidade obtida.

Diferentemente da metodologia FMEA, a metodologia Bow-Tie é estruturada a partir do evento topo e de suas consequências. Por esse motivo, os impactos foram enquadrados em níveis mais elevados, uma vez que a análise considera a ruptura da barragem e a formação da onda de inundação como consequências finais do risco.

Os cenários de galgamento, erosão interna e liquefação foram classificados com probabilidade L2 – Muito improvável e impacto C6 – Extrema. Já o cenário de instabilização foi enquadrado com probabilidade L1 – Quase impossível e impacto C6 – Extrema, em função da baixa probabilidade associada à solicitação considerada, como sismos naturais relevantes.

Assim, a metodologia Bow-Tie apresentou resultados mais conservadores em relação à metodologia FMEA, com todos os cenários posicionados na faixa tolerável da matriz. Essa diferença ocorre porque a metodologia Bow-Tie avalia o evento topo e suas consequências finais, enquanto a metodologia FMEA permite considerar o estágio em que o modo de falha poderia ser detectado ou controlado.

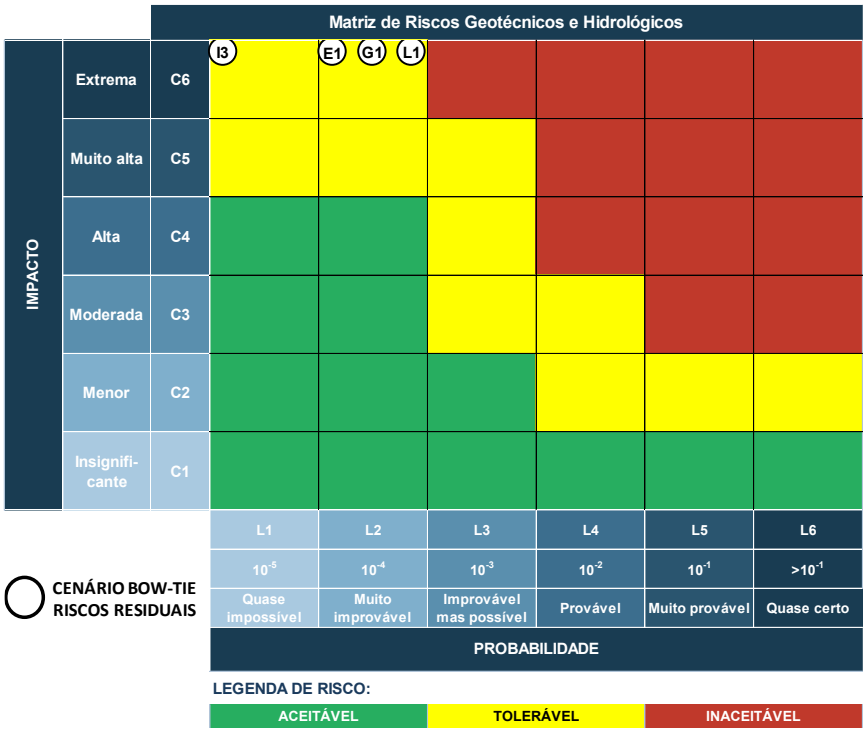


Figura 4 – Matriz de Riscos – Bow-Tie.

.

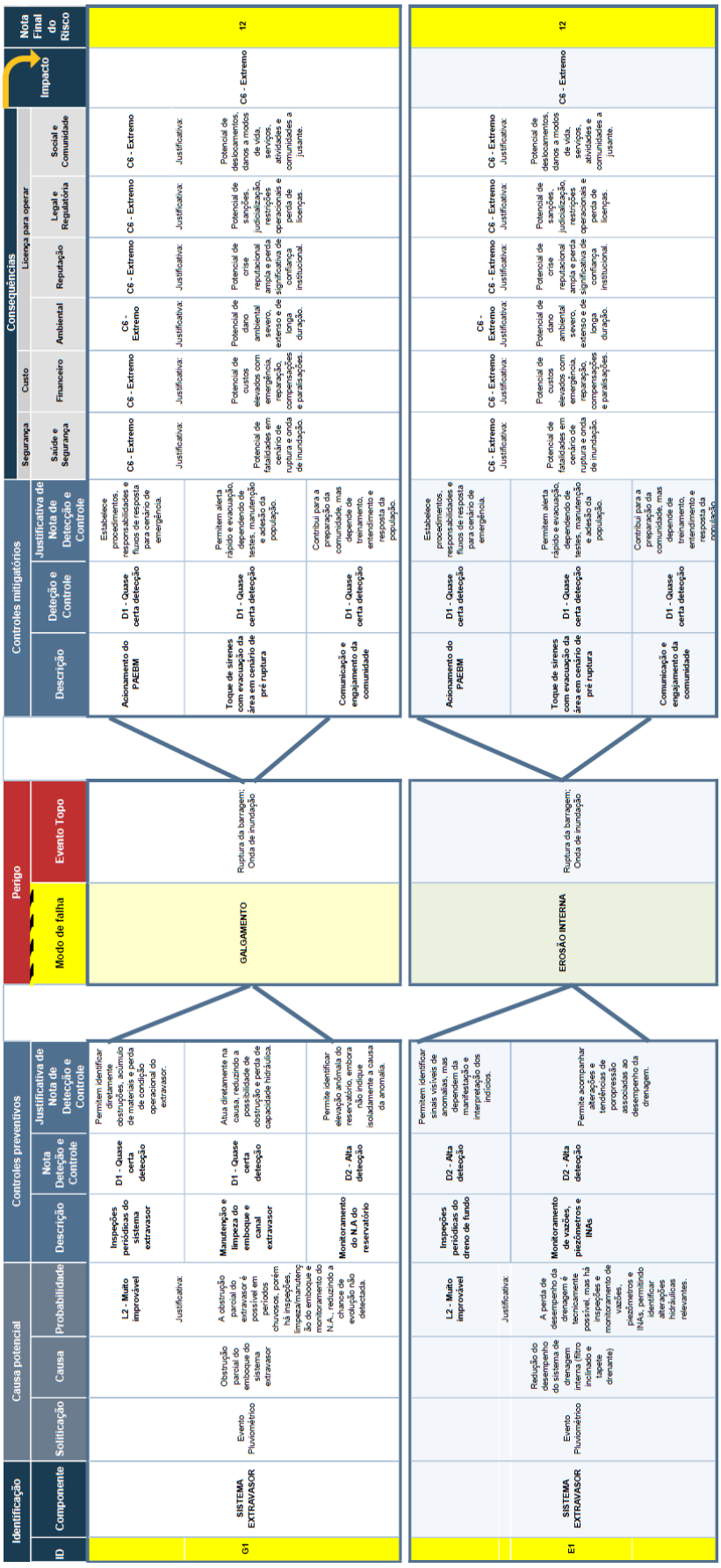


Figura 5 – Nota e riscos avaliados – Bow-Tie Riscos G1 e E1.

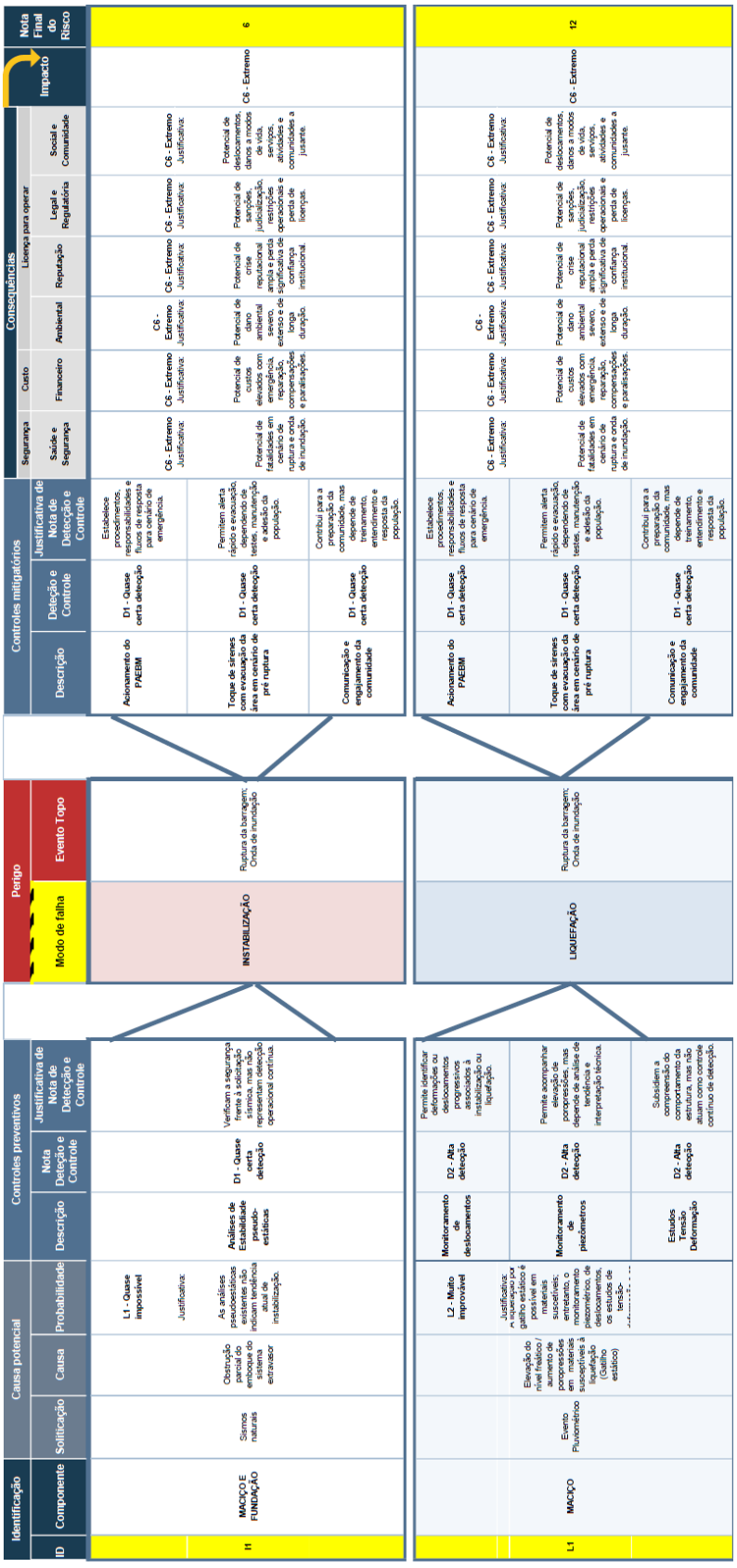


Figura 6 – Nota e riscos avaliados – FMEA – Riscos I1 e L1.

4.4 Comparação entre as metodologias FMEA e Bow-Tie

A comparação entre as metodologias demonstrou que os diferentes enquadramentos de criticidade estão diretamente relacionados à forma como cada abordagem considera a evolução do risco e seus efeitos.

Na metodologia FMEA, os riscos foram avaliados até o estágio em que seus efeitos poderiam ser identificados pelos controles existentes. Dessa forma, a metodologia permitiu considerar a atuação de inspeções, instrumentos de monitoramento e análises técnicas antes da evolução para ruptura. Essa característica possibilitou maior diferenciação entre os cenários avaliados e evitou que todos os modos de falha fossem classificados apenas com base na consequência final mais severa.

Na metodologia Bow-Tie, por outro lado, a análise foi conduzida considerando a ruptura da barragem como evento topo. Por isso, os impactos finais foram mais severos, especialmente nas dimensões de saúde e segurança, meio ambiente, reputação, legal/regulatória e social/comunidade. Essa abordagem tornou a classificação mais conservadora, pois os cenários foram avaliados a partir da possibilidade de evolução até a ruptura e formação de onda de inundação.

Assim, a metodologia FMEA mostrou-se mais adequada para a hierarquização dos riscos com base em efeitos observáveis, controles existentes e capacidade de detecção. O Bow-Tie, por sua vez, mostrou-se mais eficiente para representar a trajetória completa do risco, evidenciar a função das barreiras preventivas e mitigatórias e comunicar de forma visual os caminhos que podem levar ao evento topo.

Portanto, as metodologias não devem ser interpretadas como excludentes, mas sim como complementares. Enquanto a FMEA contribui para priorizar os cenários de risco a partir de critérios de probabilidade, impacto e detecção/controle, o Bow-Tie permite aprofundar a compreensão dos cenários, destacando causas, barreiras, evento topo e consequências finais.

5. CONCLUSÕES

O presente artigo teve como objetivo aplicar e comparar as metodologias FMEA e Bow-Tie na avaliação qualitativa de riscos em uma barragem de terra hipotética, denominada Barragem B1. Para isso, foram considerados quatro cenários representativos, sendo um risco associado a cada modo de falha avaliado: galgamento, erosão interna, instabilização e liquefação.

Os resultados demonstraram que as metodologias FMEA e Bow-Tie apresentam diferenças no enquadramento da criticidade dos riscos. Na FMEA, os cenários foram avaliados considerando os efeitos que poderiam ser identificados pelos controles existentes, como inspeções, monitoramento do nível d’água, piezometria, vazões, deslocamentos, trincas, surgências e turbidez. Já no Bow-Tie, o evento topo foi associado à ruptura da barragem e à formação de onda de inundação, o que resultou em uma classificação mais conservadora, especialmente em razão das consequências finais consideradas.

Conclui-se que as metodologias são complementares. A metodologia FMEA mostrou-se adequada para hierarquizar os riscos com base em probabilidade, impacto e detecção/controle, enquanto a metodologia Bow-Tie contribuiu para visualizar a trajetória dos eventos, a atuação das barreiras preventivas e mitigatórias e as consequências associadas ao evento topo. Como limitação, destaca-se que o estudo foi desenvolvido com base em cenário hipotético, recomendando-se, para trabalhos futuros, a aplicação das metodologias em uma barragem real, com incorporação de dados geotécnicos, hidrológicos, operacionais e instrumentais.

6. PALAVRAS-CHAVE

Análise de Risco, Segurança de Barragens, FMEA, Bow-Tie.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (1998) – “ICOLD Guidelines on Risk Assessment for Dams”, Attachment by Williams, A., ICOLD International Committee on Dam Safety, Chairman’s 1997/98 Progress Report for New Delhi Meeting, Information Letter, pp. 1–28.

[2] ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (2025) – “Relatório de Segurança de Barragens 2024–2025”, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Brasília, Brasil.

[3] SANTOS, R. N. C. (2006) – “Enquadramento das Análises de Riscos em Geotecnia”, Dissertação de Mestrado em Geotecnia para Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

[4] BRASIL (2010) – “Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010”, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, Brasília, Brasil.

[5] GLOBAL TAILINGS REVIEW (2020) – “Global Industry Standard on Tailings Management”, International Council on Mining and Metals, United Nations Environment Programme e Principles for Responsible Investment, Londres, Reino Unido.

[6] ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (2025) – “Resolução ANM nº 220, de 2025”, atualização das regras de segurança de barragens de mineração, Agência Nacional de Mineração, Brasília, Brasil.

[7] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2018) – “ABNT NBR ISO 31000:2018 – Gestão de riscos: Diretrizes”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.

[8] ROBERTSON, A. MacG.; SHAW, S. (2003) – “Risk Management for Major Geotechnical Structures on Mines”, Proceedings of Computer Applications in the Mineral Industries – CAMI, Calgary, Alberta, Canadá.

[9] CHEW, E. P.; WANG, G.; WANG, L.; SOH, J. Y.; MARGETTS, R.; CHEN, C. H. (2020) – “A Systematic Methodology for Developing Bowtie in Risk Assessment: Application to Borescope Inspection”, Aerospace, v. 7, n. 7, art. 86, Basel, Switzerland.

 FOTO 3x4	**Ingrid VIANA** Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e pós-graduada em Engenharia de Barragens pela PUC Minas. Atua na área geotécnica, com experiência em projetos, análises de estabilidade e percolação, instrumentação, ensaios geotécnicos de campo e laboratório, governança geotécnica e gestão de riscos de estruturas geotécnicas.
 FOTO 3x4	**Ana Caroline ÁGUIDO** Engenheira Ambiental (UFMG, 2016) e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG, 2022). Engenheira Sênior na GWS Engenharia atuando nas áreas de Hidrologia, Hidráulica, Segurança de Barragens, Estudos de Ruptura Hipotética, Projetos, Análises de risco em diferentes metodologias, governança geotécnica e conformidade com o GISTM. Possui passagens pelas empresas Pimenta de Ávila e Tetra Tech.
 FOTO 3x4	**Lucas BRASIL** A Engenheiro Civil (UFMG, 2002) e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG, 2005). Sócio-diretor da GWS Engenharia e professor da PUC-MG. Com passagens pela CEMIG, Pimenta de Ávila e Vale, tem experiência em Hidrologia, Hidráulica, Segurança de Barragens e Estudos de Ruptura Hipotética. Publicou trabalhos técnicos no Brasil e no exterior e integra o CBDB e a ASDSO
 FOTO 3x4	**Camila CHAVES** Engenheira Ambiental e Sanitarista (UGB, 2014) e Mestre em Engenharia de Biosistemas (UFF, 2023). Engenheira na GWS Engenharia atuando nas áreas de Hidrologia, Hidráulica, Segurança de Barragens, Estudos de Ruptura Hipotética, Projetos, Análises de risco em diferentes metodologias, governança geotécnica e conformidade com o GISTM. Possui passagens pelas empresas Walm e GhT.
 FOTO 3x4	**Mariana da COSTA** Engenheira Civil (UFOP, 2021) e pós-graduada em Engenharia de Barragens (PUC Minas, 2023). Desde 2020 na GWS Engenharia na área de geotecnia. Atua com análises de risco em diferentes metodologias, PGRBM, governança geotécnica, segurança de estruturas geotécnicas e conformidade com o GISTM.

BRAZILIAN COMMITTEE ON DAMS
I SYMPOSIUM ON LARGE GEOTECHNICAL STRUCTURES
THEME GE.4
BELÉM, PA, BRAZIL – SEPTEMBER 21–22, 2026

Cognitive Biases and Institutional Failure: Decision-Making Under Deep Uncertainty Before the 1953 Netherlands Flood Disaster—Lessons for the Global Mine Tailings Industry

SANDHU, Chaitan S.
Senior Geotechnical Engineer – NewFields Canada Inc.

LANCHOTTI, Andressa de O.
Public Prosecutor and Environmental Law Expert – MPMG

BOTHAM, Leon C.
President and Principal Engineer – NewFields Canada Inc.

JAMES, Alistair T.
Principal Geotechnical Engineer – NewFields Canada Inc.

LLOYD, Tyrel J.

Senior Hydrotechnical Engineer – NewFields Canada Inc.

ABSTRACT

Why do societies fail to act on expert warnings of catastrophic risk? The 1953 North Sea flood provides a compelling case study in decision-making under deep uncertainty, where known hazards were systematically underestimated. Despite technical assessments showing inadequate dike heights, Dutch authorities judged investment “too expensive for a risk considered too remote,” reflecting cognitive biases including availability heuristic, optimism bias, and diffusion of responsibility across fragmented governance structures. This paper develops a behavioral economics framework to analyze pre-1953 decision failures through archival records, government communications, and technical reports from 1920–1953. We identify four critical pathways to inadequate preparation:(1) anchoring on historical flood levels, (2) institutional path dependency favoring land reclamation over protection, (3) absence of formal risk acceptance criteria, and (4) social trust substituting for technical preparedness. We contrast these failures with post-1953 reforms that embedded probabilistic thinking, mandatory safety standards, and explicit risk acceptance thresholds into decision protocols. The authors draw upon their collective global technical and legal expertise in dam and tailings engineering, risk assessment, and crisis management, to explore how catastrophic failures force societies to formalize previously implicit risk judgments. The framework offers lessons for the global mining and tailings industry, where deep uncertainty and cognitive biases continue to challenge risk-informed decision-making.

RESUMO

Por que as sociedades deixam de agir diante de alertas técnicos sobre riscos catastróficos? A inundação do Mar do Norte de 1953 constitui um estudo de caso emblemático sobre a tomada de decisões em condições de profunda incerteza, no

qual perigos conhecidos foram sistematicamente subestimados. Apesar de avaliações técnicas demonstrarem a insuficiência da altura dos diques, as autoridades holandesas consideraram o investimento “caro demais para um risco considerado remoto”, refletindo vieses cognitivos como a heurística da disponibilidade, o viés do otimismo e a difusão da responsabilidade em estruturas de governança fragmentadas.

Este artigo desenvolve um arcabouço de economia comportamental para analisar as falhas decisórias anteriores a 1953, com base em registros históricos, comunicações governamentais e relatórios técnicos de 1920 a 1953. Identificamos quatro fatores críticos: (1) ancoragem nos níveis históricos de inundação; (2) dependência da trajetória institucional, priorizando a recuperação de terras em detrimento da proteção; (3) ausência de critérios formais de aceitação de riscos; e (4) confiança social em substituição à preparação técnica.

Contrastamos essas falhas com as reformas implementadas após 1953, que incorporaram raciocínio probabilístico, padrões obrigatórios de segurança e limites explícitos de aceitação de risco aos protocolos decisórios. Com base em sua experiência internacional em engenharia de barragens e rejeitos, avaliação de riscos e gestão de crises, os autores demonstram como falhas catastróficas levam as sociedades a formalizar julgamentos de risco antes implícitos. O arcabouço proposto oferece lições para a indústria global de mineração e barragens de rejeitos, na qual a profunda incerteza e os vieses cognitivos continuam a desafiar a tomada de decisões baseada em riscos.

1 Introduction & Purpose

The paradox of expert warnings preceding catastrophic failures represents one of the most persistent challenges in risk management and governance. Across industries and societies, technical experts routinely identify hazards that could lead to devastating consequences, yet decision-makers frequently fail to implement adequate preventive measures. This disconnect between knowledge and action becomes particularly acute in contexts of deep uncertainty; situations where probabilities cannot be precisely quantified, consequences extend beyond historical experience, and multiple stakeholders hold conflicting risk perceptions.

The global mining and tailings industry faces precisely these challenges today. Despite unprecedented advances in geotechnical engineering, risk assessment methodologies, and monitoring technologies, tailings storage facility (TSF) failures continue to occur with increased frequency. The Brumadinho (2019) and Samarco (2015) disasters in Brazil, and Mount Polley in Canada (2014), represent just a few recent examples where known technical risks materialized into catastrophic consequences, despite existing warning signs and expert concerns. These failures raise fundamental questions about decision-making processes under uncertainty and the persistent influence of cognitive biases on risk judgment.

This paper examines the 1953 Netherlands flood disaster as a historical case study of institutional failure under deep uncertainty, drawing lessons that remain directly relevant to contemporary tailings management challenges. The Netherlands flood, which claimed 1,835 lives and devastated approximately 1,300 square kilometers of

land, occurred despite decades of technical warnings about inadequate dike protection and changing coastal conditions. Through a behavioral economics framework, we analyze how cognitive biases systematically distorted risk perceptions and decision pathways, leading to inadequate preparation despite expert knowledge of the hazard.

These pathways have important analogues in contemporary TSF management, where cognitive biases and institutional barriers may influence technical safety decisions. Although TSF failures also depend on site-specific geotechnical, hydrotechnical, operational, and governance factors, the persistence of failures shows that risk-informed decisions require more than technical capability alone.

Our analysis reveals four critical decision pathways that contributed to pre-1953 failure: anchoring on historical baselines that no longer reflected changing conditions, institutional path dependency favoring economic development over protection, absence of formalized risk acceptance criteria, and social trust that substituted for rigorous technical preparedness. These pathways find disturbing parallels in contemporary tailings management, where similar cognitive biases and institutional structures continue to influence decision-making processes.

The authors bring unique technical and legal perspectives to this analysis, combining expertise from Canadian and Brazilian regulatory contexts. Chaitan S. Sandhu, Leon Botham, Alistair James, and Tyrel Lloyd provide technical experience in dam and tailings engineering, risk assessment, and crisis management across North America and internationally. Andressa Lanchotti contributes legal and regulatory expertise as an environmental law specialist and state prosecutor in Minas Gerais, Brazil; the jurisdiction that experienced the devastating Brumadinho and Samarco disasters. This collective expertise enables us to bridge technical and legal perspectives on risk governance, drawing lessons from both successful institutional reforms and catastrophic failures.

2 Methodology: Secondary Source Analysis & Historical Contextualization

This paper employs secondary source analysis of academic studies, historical documentation, and institutional analyses that have systematically examined Dutch water governance and the 1953 flood disaster. Rather than primary archival research, which would require Dutch language proficiency and access to physical archives still undergoing digitization, we draw on the substantial body of English-language scholarly literature that has analyzed Dutch archival materials, government documents, and technical reports from the period 1920-1953.

To avoid conflating historical proof with contemporary application, the paper separates three levels of analysis: historical evidence from secondary scholarship on Dutch water governance; analogy between documented Dutch decision pathways and recurring TSF governance problems; and recommendations for mining, which are proposed as transferable risk-governance lessons rather than direct causal claims about any specific TSF failure.

Secondary Source Analysis: Our research focuses on academic studies that have systematically analyzed Dutch archival materials and historical documentation. These

academic studies provide rigorous analysis of primary archival materials, making Dutch historical records and decision processes accessible to international researchers.

Methodological Transparency and Limitations: This paper relies primarily on peer-reviewed secondary sources and published institutional analyses, not original Dutch archival research. As a result, the analysis does not claim to reconstruct every pre-1953 decision, quantify the relative weight of each bias, or prove direct causation between cognitive mechanisms and specific policy choices. Instead, it uses well-documented historical interpretations to identify plausible decision patterns and to develop a structured analogy for TSF governance. Broad claims are therefore framed as risk-governance lessons and hypotheses for practice, rather than as definitive empirical findings across all mining jurisdictions.

Contemporary Professional Experience: This historical analysis is complemented by the authors' professional experience in TSF risk assessment, engineering design, crisis response, and regulatory enforcement across Canadian and Brazilian jurisdictions. These observations are used to interpret practical relevance and identify recurring governance challenges; they are not presented as a statistically representative survey of the global mining industry.

2.1 Literature Review

Key sources and summary of the findings relevant to the scope of this paper are discussed in the section below:

BERGSMA (2017) [1] traces the evolution of Dutch and American flood governance from engineering-dominated safety frameworks to risk-informed spatial planning approaches. Analyzing the Netherlands' post-1953 institutional transformation, Bergsma demonstrates how expert-policymaker interactions shaped flood governance discourse and distributive decision-making. The thesis reveals how the Zuiderzee Works established a "strong" safety policy frame that, paradoxically, invited counterinterpretations, and how catastrophic flood events catalyzed transitions from implicit trust in engineering solutions to formalized probabilistic risk management—directly informing this paper's analysis of institutional path dependency and post-disaster governance reform.

HUSBY et al. (2000) [2] used dynamic difference-in-differences analysis of Dutch municipal population data from 1947 to 2000, to document the immediate negative population impact of the 1953 flood alongside the long-term positive effects of the Delta Works mitigation program. Their findings reveal an unintended consequence: Delta Works infrastructure ultimately increased population concentration in flood-vulnerable areas, illustrating how public investment in risk reduction can displace private self-protection and generate new institutional risk. This evidence of post-disaster mitigation producing optimism bias at a societal scale directly supports this paper's framework for understanding risk perception distortions in infrastructure governance.

TVERSKY & KAHNEMAN (1973) [3] pioneered the bias theory by conducting foundational study which demonstrated that people judge the probability and frequency of events by the ease with which relevant instances come to mind, known as the availability heuristic. Through ten experimental studies, they show that availability systematically biases risk perception: events that are cognitively accessible are overestimated in frequency, while infrequent or remote hazards are underestimated. This mechanism directly explains pre-1953 Dutch decision-making failures, where the

absence of recent major floods suppressed risk perception, and has direct application to the mining and tailings industry where low-frequency, high-consequence TSF failures remain cognitively underweighted in organizational decision-making.

KAHNEMAN and TVERSKY (1979) [4] presents Prospect Theory as an empirically grounded alternative to expected utility theory. They demonstrate that decision-makers systematically underweight probable outcomes relative to certain ones (certainty effect), treat losses as more psychologically significant than equivalent gains (loss aversion), and overweight low probabilities while underweighting moderate-to-high probabilities. These behavioral patterns explain why Dutch authorities before 1953 perceived dike reinforcement costs as certain losses against uncertain flood benefits, and why mining executives today consistently underinvest in TSF risk reduction, framing safety expenditure as definite costs against probabilistically remote failure scenarios.

KUNREUTHER and HEAL (2012) [5] examined why decision-makers systematically fail to invest in protective measures against low-probability, high-consequence catastrophic risks. They identify behavioral biases including budgeting heuristics, myopic loss aversion, and the tendency to ignore risks until after a disaster occurs as principal drivers of underinvestment. Their analysis demonstrates that in interdependent systems without public sector intervention, underinvestment in protection may be economically rational at the individual level while catastrophic at the collective level. They propose private-public partnerships, multi-year insurance contracts, and enforced regulations as corrective mechanisms, directly informing this paper's recommendations for RIDM governance frameworks in the dam and tailings industry.

ROCHE et al. (2017) [6] conducted the UNEP rapid response assessment, motivated by the human and environmental costs of the Samarco (2015) and Mount Polley (2014) disasters, and provide a comprehensive examination of why tailings dam failures continue despite decades of established principles and recommendations. The report documents that while overall annual failure numbers have declined, serious failures have increased and identifies an estimated 3,500+ tailings dams globally with no publicly accessible inventory. It makes two core recommendations: placing safety explicitly above economic considerations and establishing a UN Environment stakeholder forum for international regulatory strengthening—establishing the governance gap that motivates this paper's RIDM framework application.

ICMM (2020) [7] establishes the mining industry's most comprehensive governance framework for tailings facility safety, organized around 15 principles covering affected communities, knowledge integration, design and construction, management and governance, emergency response, and public disclosure. Its ultimate goal of "zero harm to people and the environment with zero tolerance for human fatality" represents a paradigm shift from compliance-based to effectiveness-based tailings management. By requiring operators to prioritize safety across all lifecycle phases and disclose information publicly, GISTM creates the accountability architecture within which this paper's behavioral economics framework operates to translate technical risk information into actionable executive decisions.

GERRITSEN (2005) [8] conducted the retrospective analysis documenting the technical, institutional, and human factors that transformed a low-probability storm surge into a catastrophic disaster. He demonstrated that pre-1953 dyke heights were determined solely by historical high-water records with no probabilistic safety analysis, that fragmented polder governance with over 200 independent boards precluded

coordinated risk management, and that official flood warnings were structurally ineffective. His central finding, that prevention was technically foreseeable but institutionally impossible, directly evidences the cognitive bias and governance failure mechanisms analyzed in this paper.

SANDHU, et al. (2026) [9][1] in the peer-reviewed paper by core members of the CDA-USSD RIDM Working Group presents a joint position statement and implementation roadmap for RIDM in mining dams and TSFs. Drawing on a literature review of over 100 cross-industry publications and workshops in Niagara Falls (2024) and Saskatoon (2025), it identifies practice gaps including terminology confusion, inconsistent application, and insufficient guidance on translating risk assessments into defensible decisions. It argues every historical TSF failure was predictable in hindsight, attributing failures to decisions "poorly informed by lack of understanding of risks", providing the contemporary industry baseline against which this paper's behavioral economics framework is benchmarked.

2.2 The 1953 Netherlands Flood Disaster: A Case Study

2.2.1 *Historical Context and Technical Assessments*

The Netherlands has historically engaged in an ongoing battle against water, with approximately one-third of the country lying below sea level. This geographic reality necessitated sophisticated water management systems dating back centuries, including an extensive network of dikes, sluices, and pumping stations. By the early 20th century, Dutch water management was widely regarded as among the most advanced in the world, demonstrating considerable technical capability in flood protection.

However, beginning in the 1920s, technical experts began raising concerns about the adequacy of existing dike protection in the face of changing coastal conditions. Rising sea levels, coastal subsidence from peat extraction and gas drilling, and changes in storm patterns all suggested that historical flood levels might no longer provide reliable design criteria. Technical reports from the Rijkswaterstaat (the Dutch water authority) throughout the 1920s and 1930s documented these concerns and recommended significant investments in dike reinforcement and elevation [8].

Despite these technical warnings, investment in flood protection remained limited throughout the interwar period and into the 1940s. Annual budgets consistently prioritized other infrastructure projects, particularly land reclamation efforts that expanded agricultural and living space at the expense of protective infrastructure. The economic depression of the 1930s further constrained public investment, while World War II and its aftermath diverted attention and resources to reconstruction efforts [1].

2.2.2 The Catastrophic Event

On the night of January 31, 1953, a powerful North Sea storm combined with high spring tides created a storm surge of unprecedented magnitude. Water levels exceeded historical records by several meters, overwhelming dike systems throughout the southwestern Netherlands. Particularly vulnerable were the provinces of Zeeland,

[1] "This document/presentation was prepared by select members of a Working Group that comprises membership from the CDA and USSD. It is not an official CDA guidance product and has not been endorsed by CDA as a position statement. It presents the individual views of the authors and members of the Working Group in their professional capacities. The information in this document/presentation is to be considered a work in progress with portions potentially included in future official CDA documents. "

South Holland, and North Brabant, where extensive areas of land below sea level faced catastrophic inundation.

D'ANGREMOND (2003) [10] further describes the extensive devastation caused when the storm breached dikes in dozens of locations, allowing seawater to flood vast areas. The disaster resulted in approximately 1,835 fatalities and the loss of nearly 200,000 livestock. Over 47,000 buildings were damaged or destroyed, and approximately 1,300 square kilometers of land were flooded. The economic damage was estimated at over 1 billion Dutch guilders, an enormous sum equivalent to roughly 5% of the country's GDP at the time.

Perhaps most tellingly, post-disaster investigations revealed that many breached dikes had been identified as inadequate in technical reports decades earlier. The disaster was not caused by unknown hazards or unforeseeable events, but by the failure to implement known solutions to well-documented problems. This realization sparked a fundamental reexamination of Dutch water governance and risk management approaches.

2.3 Parallels to Contemporary Tailings Management

The comparison between the 1953 Netherlands flood and contemporary TSF failures is used as an analogy, not an assertion that flood defence systems and TSFs fail in the same technical manner. The relevant connection is at the decision level: in both contexts, expert warnings, monitoring information, and known vulnerabilities may fail to trigger timely investment, operational restriction, redesign, or emergency preparedness when risks are perceived as remote or institutionally inconvenient.

Recent TSF failures such as Brumadinho (2019), Samarco (2015), and Mount Polley (2014) illustrate how cognitive and institutional factors can influence technical safety decisions. Depending on the facility, these decisions may involve acceptance of liquefaction susceptibility, water balance assumptions, drainage performance, buttressing or raising methods, monitoring thresholds, emergency trigger levels, or responses to observed deviations from design intent. The paper does not argue that one bias caused these failures; rather, it examines how biases can shape the interpretation of technical evidence before failure.

In practical TSF governance, these biases affect safety when they influence whether decision-makers classify a condition as tolerable, require additional investigation, fund remediation, lower pond levels, revise operating rules, halt deposition, or escalate emergency preparedness. The technical failure mode may be geotechnical, hydrotechnical, or operational, but the preventability often depends on how organizations convert uncertain evidence into binding decisions. This pattern suggests that the fundamental challenge lies not in technical capability or knowledge, but in decision-making processes that systematically undervalue catastrophic risks, particularly when probabilities appear low and immediate costs of prevention appear high. Understanding why these decision failures occur and how they might be prevented requires examining the cognitive and institutional factors that influence risk judgment under deep uncertainty.

3 Behavioral Economics Framework for Risk Decisions

3.1 Cognitive Biases in Risk Assessment

Behavioral economics research has identified numerous systematic biases that can distort judgment under uncertainty. Three biases are especially useful for interpreting the historical Dutch case and for examining analogous TSF safety decisions, while recognizing that documentary evidence rarely permits precise attribution of a specific decision to a single cognitive mechanism:

Availability Heuristic: People assess the likelihood of events based on how easily examples come to mind. Events that are recent, dramatic, or frequently discussed appear more probable than events that are rare or receive little attention. In the Dutch context, the absence of major floods between 1825 and 1953 created a false sense of security. The lack of recent catastrophic events made the risk appear remote, despite technical evidence suggesting otherwise.

In contemporary TSF management, availability bias can make rare failure modes such as static liquefaction, internal erosion, overtopping, foundation instability, or uncontrolled water release, appear less urgent when a facility has operated for years without incident. This may delay conservative redesign, monitoring escalation, or operational restrictions despite technical warning signs.

Optimism Bias: Individuals and organizations tend to overestimate the likelihood of positive outcomes and underestimate the probability of negative ones. This bias manifests as unwarranted confidence in existing infrastructure, operating procedures, and technical solutions. The pre-1953 Dutch water management system demonstrated classic optimism bias, with authorities maintaining unjustified confidence in existing dike designs despite technical evidence of their inadequacy. In the mining industry, optimism bias appears in several forms. Operators often express confidence that their facilities are “different” from those that have failed, citing unique design features, operating procedures, or geological conditions. This bias can persist even when objective risk assessments indicate vulnerabilities similar to those that contributed to past failures. The belief that “it won’t happen here” represents one of the most persistent barriers to proactive risk management.

In TSF management, optimism bias can appear when operators assume their facility is “different” because of site-specific design, operating history, or controls. Such confidence may affect decisions on factor-of-safety interpretation, trigger-action response plans, deposition rates, pond management, surveillance frequency, and acceptance of deviations from design assumptions.

Anchoring Bias: When making decisions under uncertainty, people tend to fixate on initial information or reference points and adjust insufficiently from these anchors. Historical flood levels served as powerful anchors for Dutch decision-making, with new information about changing conditions given insufficient weight relative to established baselines. In TSF design and operation, anchoring bias appears through reliance on historical precedent and established practice. Design standards often reflect historical experience rather than forward-looking risk assessment, with new technologies or changing conditions treated as incremental adjustments to established approaches rather than opportunities for fundamental rethinking of risk management paradigms.

In TSF design and operation, anchoring bias may appear through continued reliance on historical rainfall records, previous material parameters, legacy construction methods, or past performance. These anchors can reduce the weight given to new climate projections, changed tailings properties, updated liquefaction understanding, or monitoring anomalies requiring reassessment.

3.2 Deep Uncertainty and Decision Pathways

Deep uncertainty refers to situations where decision-makers cannot agree on probability distributions for key variables, cannot enumerate all possible outcomes, or cannot foresee how their preferences might change over time. Under these conditions, traditional cost-benefit analysis based on expected values becomes unreliable, and decision processes must rely on judgment, scenario planning, and adaptive management.

The pre-1953 Dutch water management system operated under deep uncertainty regarding future sea level rise, coastal subsidence rates, and storm intensity. Technical experts could identify trends and hazards but could not provide precise probabilistic forecasts. This uncertainty created decision paralysis, with authorities reluctant to make substantial investments in protection without clear cost-benefit justification.

Similarly, contemporary TSF management operates under deep uncertainty regarding climate change impacts, extreme precipitation events, long-term material behavior, and social license to operate. Traditional engineering approaches based on historical weather patterns and material properties may become increasingly inadequate under changing conditions, yet decision-making frameworks often struggle to incorporate these uncertainties systematically.

4 Four Critical Decision Pathways

4.1 Pathway 1: Anchoring on Historical Baselines

The first critical pathway involved systematic anchoring on historical flood levels as design criteria, despite evidence that coastal conditions were changing. Throughout the 1920s and 1930s, Dutch technical authorities documented rising sea levels, coastal subsidence from peat extraction and gas drilling, and changes in storm patterns. However, these changing conditions were treated as incremental adjustments to established design baselines rather than fundamental challenges to historical design approaches.

Archival records from Rijkswaterstaat technical committees reveal repeated recommendations to increase dike heights and reinforce structures based on updated hydraulic modeling. These recommendations consistently faced resistance from budget authorities and elected officials who argued that historical experience provided adequate guidance for design standards. The absence of catastrophic floods since 1825 served as a powerful anchor, making recommended increases appear excessive relative to observed risk.

In contemporary TSF management, similar anchoring on historical baselines persists throughout the industry. Design standards often reflect decades-old engineering practice, with new methodologies treated cautiously relative to established approaches. Climate change projections, which suggest more extreme precipitation

events and changing hydrological conditions, are often incorporated as incremental adjustments rather than fundamental reevaluations of design philosophies.

The authors have observed this anchoring bias in both Canadian and Brazilian regulatory contexts. TSF designs based on historical precipitation records and material properties may not adequately account for changing conditions, yet modifying these established approaches faces resistance from regulators, operators, and engineering consultants who are accustomed to historical practice as the reference point for adequacy.

4.2 Pathway 2: Institutional Path Dependency

The second critical pathway involved institutional path dependency favoring economic development over protective infrastructure. The Dutch water management system had evolved over centuries, with established bureaucratic structures, professional networks, and decision-making processes that prioritized land reclamation and agricultural development. These institutional arrangements created momentum that was difficult to redirect toward flood protection, even when technical evidence suggested this was necessary.

Throughout the second world war period, budget priorities consistently favored new land reclamation projects over dike reinforcement. The Zuiderzee Works, a massive land reclamation project begun in 1920, absorbed substantial financial resources and political attention despite technical concerns about existing dike vulnerabilities. Institutional culture within water management agencies emphasized expansion and development rather than safety and resilience.

This institutional path dependency finds clear parallels in contemporary TSF management. Mining organizations often face competing priorities between production optimization and safety investment. Short-term economic pressures, shareholder expectations, and production targets can create institutional momentum that favors cost minimization over safety enhancement. TSF upgrades and monitoring improvements often compete for capital against production expansion projects, with short-term economic benefits frequently prevailing over long-term safety considerations.

The authors' experience in Canadian and Brazilian mining contexts reveals how organizational structures and incentives can create path dependency that resists safety investments even when technical assessments identify vulnerabilities. Engineering departments focused on production optimization may have different priorities and decision-making authority than safety and risk management groups, creating institutional barriers to coordinated risk reduction efforts.

4.3 Pathway 3: Absence of Formalized Risk Acceptance Criteria

The third critical pathway involved the absence of formalized risk acceptance criteria, making it difficult to justify investments in protection based on objective risk metrics. Without explicit criteria defining acceptable levels of risk, decisions about flood protection devolved to subjective judgment and political negotiation rather than technical analysis.

Pre-1953 Dutch water management lacked systematic frameworks for comparing costs of protective measures against expected benefits in terms of reduced risk. Technical reports could identify hazards and recommend improvements, but without explicit risk tolerance criteria, budget authorities could legitimately argue that the investments were not justified relative to perceived risks. The absence of formalized criteria made it difficult to challenge decisions based on different risk tolerances.

This absence of formalized risk acceptance criteria remains a significant challenge in contemporary TSF management. While many organizations have adopted quantitative risk assessment methodologies, explicit criteria for acceptable versus unacceptable risk levels often remain poorly defined. Without clear risk tolerance thresholds, decisions about safety investments can become arbitrary or inconsistent, with different projects subject to different standards based on organizational politics or individual judgment.

The authors have observed this challenge in regulatory enforcement across both Canadian and Brazilian jurisdictions. Prosecutors and regulators often struggle to establish clear standards for adequate TSF safety measures when legal frameworks do not define explicit risk acceptance criteria. This ambiguity can create loopholes that allow operators to delay safety investments while maintaining compliance with minimum regulatory requirements.

4.4 Pathway 4: Social Trust Substituting for Technical Preparedness

The fourth critical pathway involved social trust in institutional competence substituting for rigorous technical preparedness. The Dutch water management system enjoyed considerable public confidence, with centuries of successful flood protection creating an assumption that authorities would adequately manage risks. This social trust reduced pressure for transparency and accountability, allowing decision failures to persist without public scrutiny or demand for corrective action.

Parliamentary debates and public discourse throughout the 1930s and 1940s reveal remarkably limited public concern about flood risks relative to other policy priorities. The absence of recent catastrophic events created complacency, with the public assuming that existing institutional arrangements would provide adequate protection. This social trust reduced political pressure for investment in flood protection and allowed technical warnings to be discounted without significant public backlash.

Similar patterns of social trust substituting for technical preparedness appear in contemporary TSF management. Mining companies often enjoy social license to operate in communities where they provide employment and economic benefits, creating public trust that safety is being adequately managed. However, this trust can reduce pressure for transparency and external oversight, allowing technical vulnerabilities to persist without public scrutiny or demand for corrective action.

The Brumadinho disaster in Brazil provides a tragic example of how social trust can substitute for technical preparedness. The mine operator had maintained relationships with local communities and provided economic benefits, creating an assumption that safety was being adequately managed despite technical concerns about TSF stability. The catastrophic failure revealed that this social trust was not backed by adequate technical preparedness or regulatory oversight.

5 Post-1953 Institutional Reforms

The catastrophic failure of 1953 forced Dutch authorities to fundamentally reexamine their approach to flood risk management. In the disaster's aftermath, the Netherlands implemented sweeping institutional reforms that transformed water governance and established new paradigms for risk-informed decision-making. These reforms provide valuable lessons for contemporary TSF management seeking to address similar decision failures.

5.1 Probabilistic Thinking Integration

The most significant reform involved integrating probabilistic thinking into flood protection design and decision-making. Rather than relying on historical flood levels as deterministic design criteria, post-1953 frameworks adopted probabilistic approaches that explicitly considered the likelihood of different flood scenarios and the associated consequences.

The Delta Works, a massive construction project undertaken after 1953, employed probabilistic design criteria that specified acceptable failure probabilities for different dike segments based on the consequences of failure. This approach allowed for differentiated protection standards, with areas facing higher potential consequences receiving more robust protection. The probabilistic framework also made explicit trade-offs between cost and risk transparent, facilitating informed decision-making about appropriate protection levels.

For contemporary TSF management, similar integration of probabilistic thinking could transform risk-informed decision-making. Rather than treating TSF safety as binary compliance with minimum standards, probabilistic approaches could help organizations understand the distribution of possible outcomes and make informed choices about appropriate risk levels. Quantitative risk assessment methodologies already exist for TSF management, but their integration into formal decision-making processes remains limited.

5.2 Mandatory Safety Standards Implementation

The post-1953 reforms also established mandatory safety standards with clear enforcement mechanisms. Rather than leaving protection levels to discretionary budget decisions, Dutch law established minimum safety requirements that could not be compromised based on cost considerations. These standards were incorporated into formal regulations with specific enforcement mechanisms and accountability frameworks.

The establishment of mandatory standards reduced reliance on subjective judgment in determining adequate protection levels. Rather than requiring authorities to justify safety investments through case-by-case analysis, minimum standards provided clear benchmarks that could not be compromised without formal regulatory amendment. This reduced the influence of cognitive biases and political considerations on safety decisions.

In contemporary TSF management, mandatory safety standards have increased following high-profile failures, particularly in jurisdictions like Brazil where post-Brumadinho reforms established more rigorous requirements. However, implementation and enforcement remain inconsistent across jurisdictions. The authors' experience suggests that clear, enforceable safety standards with explicit accountability mechanisms are essential for overcoming cognitive biases and institutional path dependency that favor cost minimization over safety investment.

5.3 Explicit Risk Acceptance Thresholds

Perhaps the most transformative reform involved establishing explicit risk acceptance thresholds that made societal risk tolerance transparent and defensible. Rather than treating risk acceptance as implicit or subjective, Dutch authorities formally articulated acceptable levels of flood risk for different consequence categories, creating a framework for consistent decision-making across different projects and contexts.

These explicit thresholds served several important functions. They provided objective criteria for evaluating whether protection levels were adequate, reducing reliance on subjective judgment. They made trade-offs between cost and risk transparent, facilitating public debate and accountability. And they created consistency across different projects and regions, reducing arbitrary or inconsistent decision-making.

For TSF management, establishing explicit risk acceptance thresholds could transform decision-making processes in similar ways. While many organizations have internal risk tolerance policies, these are often poorly documented and inconsistently applied. Formalizing explicit thresholds for acceptable TSF failure probabilities and consequences could create frameworks for more consistent, transparent, and accountable risk-informed decision-making.

5.4 Externalization of Implicit Risk Judgments

The post-1953 reforms externalized previously implicit risk judgments through formalized decision frameworks that made assumptions, criteria, and trade-offs explicit and transparent. Rather than relying on unstated assumptions about acceptable risk levels or implicit judgments about cost-benefit trade-offs, new frameworks required formal documentation and justification of risk decisions.

This externalization created accountability for risk decisions that had previously been hidden within bureaucratic processes. Decision-makers could no longer rely on unstated assumptions or subjective judgments without documentation and justification. This increased transparency and accountability helped overcome cognitive biases by forcing explicit consideration of alternatives and documentation of reasoning.

Contemporary TSF management could benefit from similar externalization of implicit risk judgments. Formal decision frameworks that require documentation of risk assumptions, explicit consideration of alternatives, and justification of chosen approaches could help overcome cognitive biases and create more accountable risk management processes. The authors have observed that organizations with more formalized risk decision processes tend to make more consistent and defensible risk management choices.

6 Applications to Contemporary Mining and Tailings Industry

The lessons from the 1953 Netherlands flood disaster and subsequent institutional reforms offer relevant, but context-dependent, applications to contemporary challenges facing the global mining and tailings industry. Although based primarily on secondary historical sources, this analysis suggests that cognitive biases affecting risk perception and technical safety decisions may also influence tailings storage facility (TSF) governance. The transfer is strongest at the level of risk-governance principles—explicit criteria, accountability, transparency, and adaptive management—rather than at the level of identical hazards or institutional settings.

6.1 Climate Adaptation Challenges

Climate change represents one of the most significant sources of deep uncertainty for contemporary TSF management. Changes in precipitation patterns, increased frequency of extreme weather events, rising sea levels for coastal facilities, and changing hydrological conditions all challenge historical design assumptions. The Netherlands' experience with changing coastal conditions provides valuable lessons for adapting TSF design and operation to climate change.

The anchoring bias on historical baselines that contributed to the 1953 disaster finds clear parallels in contemporary TSF design. Design standards based on historical precipitation records and material properties may not adequately account for changing conditions. The authors have observed in both Canadian and Brazilian contexts that incorporating climate change projections into TSF design often faces resistance due to uncertainty about appropriate design parameters and concerns about increased costs.

The probabilistic approaches adopted in post-1953 Dutch water management offer a model for climate adaptation in TSF management. Rather than seeking precise deterministic design parameters, probabilistic frameworks can accommodate uncertainty by considering a range of possible climate scenarios and their implications for TSF safety. This approach allows for adaptive management that can be updated as climate science advances and conditions evolve.

6.2 Critical Infrastructure Resilience

TSFs represent critical infrastructure with potential for catastrophic consequences extending beyond immediate property damage to include loss of life, environmental contamination, and long-term socioeconomic disruption. The Netherlands' experience highlights the importance of treating such critical infrastructure with appropriate precaution and robust protection, even when historical experience suggests low failure probabilities.

The institutional path dependency that favored economic development over flood protection in the pre-1953 Netherlands finds disturbing parallels in contemporary mining contexts. Production pressures, shareholder expectations, and short-term economic considerations can create barriers to adequate safety investment for TSFs, even when technical assessments identify vulnerabilities. The authors have observed that TSF safety improvements often compete for capital against production expansion projects, with economic considerations frequently prevailing.

The mandatory safety standards and explicit risk acceptance thresholds established after 1953 provide models for enhancing TSF critical infrastructure resilience. Clear regulatory requirements with explicit accountability mechanisms can help overcome institutional path dependency and ensure that TSF safety receives appropriate priority relative to other organizational objectives. The authors' experience in Brazilian regulatory enforcement suggests that such standards are most effective when combined with robust oversight and meaningful enforcement mechanisms.

6.3 Cognitive Biases in Modern TSF Management

The cognitive biases examined in the 1953 case may also influence contemporary TSF safety decisions. Availability bias can encourage complacency where failures are infrequent; optimism bias can support excessive confidence in existing controls; and anchoring bias can preserve historical design assumptions even when climate, materials, operations, or monitoring data change.

The authors' Canadian and Brazilian experience suggests that these patterns can arise in practice when recommendations are discounted because no recent local failure has occurred, when operators emphasize differences from failed facilities, or when established practice is treated as sufficient despite new evidence. These observations support the analogy but do not substitute for facility-specific investigation.

Externalizing implicit risk judgments through formalized decision frameworks represents one promising approach for mitigating these cognitive biases. Decision

processes that require explicit documentation of assumptions, consideration of alternatives, and justification of chosen approaches can help overcome biases by forcing systematic consideration of evidence and alternatives. The authors have observed that organizations with more formalized risk governance processes tend to make more consistent and defensible TSF risk management decisions.

6.4 Canadian Regulatory Context

The Canadian regulatory environment for TSF management has evolved significantly following the Mount Polley disaster, with enhanced requirements for independent review, transparency, and risk assessment. However, challenges remain in implementing consistent risk-informed decision-making across different jurisdictions and organizations.

The authors' experience in Canadian Tailings Dam engineering and risk assessment reveals variability in how different provinces and territories approach TSF regulation and enforcement. While federal guidelines provide frameworks for TSF management, provincial regulations vary in their specificity and requirements. This fragmentation creates challenges for consistent implementation of risk-informed decision-making approaches.

The Netherlands' experience with national standards applied consistently across different regions offers lessons for Canadian TSF regulation. While respecting provincial jurisdiction, more consistent national frameworks for TSF risk management could help ensure comparable safety standards across the country. The authors have observed that Canadian organizations operating in multiple provinces often face inconsistent requirements, creating implementation challenges and potential loopholes.

6.5 Brazilian Legal Framework and Enforcement

Brazil's TSF regulatory framework was profoundly reshaped after the catastrophic Samarco and Brumadinho dam failures. In response, the National Mining Agency (ANM) revised key rules on Emergency Action Plans (PAEBMs), created the Integrated Mining Dam Safety Management System (SIGBM) to centralize monitoring data, and expanded on-site inspections, particularly in Minas Gerais.

Drawing on the authors' experience in Brazilian TSF regulation and enforcement—particularly Dr. Lanchotti's role as a state prosecutor in Minas Gerais—these reforms represent important progress, but significant gaps remain. While legal requirements are stronger, implementation is uneven: some operators struggle to comply, while others seek delays or regulatory loopholes.

A key unresolved weakness is the credibility of external assurance. Brazil's two most severe recent mining disasters involved dams that had received stability declarations from external auditors shortly before failure. This exposes the conflict of interest inherent in certifications issued by firms hired, retained, or expecting future work from the companies they assess.

For external review to be credible, it must rest on independence, technical excellence, proven expertise, and transparency. These principles should be embedded in regulation. Dam safety reports, audits, and periodic reviews should be conducted by qualified professionals or firms selected through an independent regulatory mechanism, with costs borne by the operator but without influence over appointments or outcomes.

In this regard, the Netherlands Commission for Environmental Assessment (NCEA) offers a valuable model. Its independent expert-review system shows how technical quality can be combined with institutional independence—an approach that could significantly strengthen Brazil's TSF governance.

6.5.1 Brazil-Netherlands Technical Cooperation: Direct Knowledge Transfer

The application of Netherlands' lessons to Brazilian TSF governance has moved beyond theoretical comparison to direct technical cooperation and knowledge transfer. In 2019, Dr. Lanchotti participated in an official technical mission from the State of Minas Gerais to the Netherlands focused on dam safety and risk governance. This mission was part of a broader technical cooperation initiative that began in 2017, recognizing the Netherlands' internationally acknowledged expertise in dam and dyke safety management.

During this mission, Brazilian officials engaged directly with the Netherlands Commission for Environmental Assessment (NCEA), learning about their independent expert-based review model. The NCEA's approach to allocating specialists to project assessments ensures technical excellence while maintaining institutional independence. These are principles directly relevant to enhancing Brazil's TSF independent review processes. The mission visited Rijkswaterstaat, the National Agency for Infrastructure and Water Management, where participants were introduced to advanced dam and dyke monitoring systems including satellite monitoring, infrared sensors, and 3D cameras. These technological innovations offer potential applications for Brazilian TSF monitoring, particularly for facilities in remote or difficult-to-access areas.

The mission also examined Dutch frameworks for allocating responsibility in cases of negligence or disasters. The Netherlands' clear accountability mechanisms offer a valuable model for addressing a persistent challenge in Brazilian TSF governance: uncertainty over liability following catastrophic failures. Technical exchanges with Royal HaskoningDHV and Deltares Foundation provided insights into integrated approaches to sustainable planning, water infrastructure, subsurface management, flood risk, and nature-based solutions—approaches that could help strengthen Brazilian TSF closure planning and long-term stewardship strategies. Dr. Lanchotti has subsequently drawn on these Netherlands lessons learned to support policy recommendations and institutional discussions in Brazil, particularly around independent technical review, risk-based governance, monitoring technologies, and clarity of accountability. This direct knowledge transfer demonstrates the practical applicability of the Netherlands' institutional reforms to contemporary Brazilian TSF governance challenges, moving beyond abstract comparison to concrete implementation strategies.

6.6 International Case Studies and Lessons

The authors' international experience across multiple jurisdictions reveals common patterns in TSF risk management challenges. While regulatory frameworks and technical standards vary across countries, similar cognitive biases and institutional barriers appear consistently, suggesting that lessons from the Netherlands' experience have broad applicability.

Case studies from the authors' professional practice illustrate how different approaches to risk-informed decision-making can produce different outcomes. Organizations with more formalized risk governance processes, explicit risk tolerance criteria, and accountable decision-making frameworks tend to make more consistent and defensible TSF risk management choices. Organizations that rely on informal

processes and subjective judgment are more vulnerable to cognitive biases and institutional path dependency that compromise safety.

The Netherlands' experience demonstrates that catastrophic failures can create opportunities for transformative institutional reforms that address underlying decision-making failures. While we should not wait for disasters to drive improvements in TSF safety, the post-1953 Dutch reforms provide a model for proactive transformation that contemporary TSF governance can emulate without requiring catastrophic failure as catalyst.

7 Conclusions and Recommendations

The 1953 Netherlands flood disaster provides an interesting historical case study of how cognitive biases and institutional structures can systematically undermine risk management despite expert knowledge of hazards and associated consequences. Our analysis reveals four critical decision pathways that contributed to this catastrophic failure: anchoring on historical baselines despite changing conditions, institutional path dependency favoring economic development over protection, absence of formalized risk acceptance criteria, and social trust substituting for technical preparedness.

These pathways find parallels in contemporary TSF management, where similar cognitive biases and institutional barriers continue to influence decision-making processes. Despite advances in technical understanding, risk assessment methodologies, and monitoring technologies, TSF failures persist, suggesting that fundamental challenges lie in decision-making processes rather than technical capability.

The post-1953 Dutch reforms that integrated probabilistic thinking, established mandatory safety standards, formalized explicit risk acceptance thresholds, and externalized implicit risk judgments provide valuable lessons for contemporary TSF governance. These reforms transformed Dutch water management from a system vulnerable to catastrophic failure into one of the world's most robust flood protection frameworks, demonstrating that institutional transformation is possible when underlying decision failures are recognized and addressed.

7.1 Key Recommendations

Based on this analysis, we offer several recommendations for enhancing risk-informed decision-making in the global mining and tailings industry:

Adopt RIDM framework for Minnig Dams and TSFs: Organizations would benefit from adopting the process on RIDM as proposed by Sandhu et al. (2026) [9]

Integrate Probabilistic Thinking and Failure Modes into decision making: Develop and implement probabilistic risk assessment and failure modes frameworks that explicitly consider uncertainty and variability in decision making for TSF design, operation, and closure planning. Rather than relying on deterministic approaches based on historical baselines, probabilistic frameworks can accommodate deep uncertainty and inform adaptive management strategies. Include independence in failure modes by selecting a neutral and experienced facilitator.

Establish Explicit Risk Acceptance Criteria: Formalize explicit risk tolerance thresholds for TSF failure probabilities and consequences at organizational and regulatory levels. These criteria should be transparent, documented, and consistently applied to create frameworks for defensible risk-informed decision-making.

Implement Mandatory Safety Standards: Strengthen regulatory frameworks with clear, enforceable safety standards that cannot be compromised based on cost considerations or subjective judgment. These standards should include explicit accountability mechanisms and oversight processes to ensure consistent implementation.

Externalize Implicit Risk Judgments: Develop formalized decision frameworks that require documentation of risk assumptions, explicit consideration of alternatives, and justification of chosen approaches. These frameworks should create accountability for risk decisions and overcome cognitive biases by forcing systematic evaluation of evidence and options.

Address Institutional Path Dependency: Examine organizational structures and incentive systems that may create barriers to TSF safety investment. Create governance frameworks that ensure safety receives appropriate priority relative to other organizational objectives and that long-term resilience considerations are not sacrificed to short-term economic pressures.

Enhance Transparency and Oversight: Implement mechanisms for external oversight and public accountability that counteract complacency and reduce reliance on implicit social trust. Regular independent reviews, transparent reporting, and stakeholder engagement can help ensure that TSF safety remains a priority and that technical concerns receive appropriate attention.

The framework developed through this analysis is most directly applicable to TSF governance and other critical infrastructure settings where low-probability, high-consequence risks must be managed under uncertainty. Its broader application should be treated as a structured analogy requiring context-specific evidence, not as a universal model.

8 Keywords

Cognitive bias, disaster risk reduction, behavioral economics, mine tailings safety, risk-informed decision making

9 References

1. BERGSMA, E. J. (2017). "*From flood safety to risk management: The rise and demise of engineers in the Netherlands and the United States?"* [Doctoral dissertation, University of Amsterdam]. UvA DARE Digital Academic Repository, Amsterdam, The Nederlands.
2. HUSBY, T., DE GROOT, H. L. F., HOFKES, M. W., & DRÖES, M. I. (2013). "The Great North Sea Flood of 1953, The Deltaworks and the spatial distribution of people". *53rd European Regional Science Association Congress*, Palermo, Italy.
3. TVERSKY, A., & KAHNEMAN, D. (1973). "Availability: A heuristic for judging frequency and probability". The Hebrew University of Jerusalem and the Oregon Research Institute, *Cognitive Psychology*, Volume 5(2), 207-232.
4. KAHNEMAN, D., & TVERSKY, A. (1979). "Prospect theory: An analysis of decision under risk". *Econometrica*, Volume 47(2), 263-291.

5. BOWMAN, E. H., & KUNREUTHER, H. C. (2021).”Managing catastrophic risks: Lessons from the Netherlands’ flood defenses. *Risk Analysis”*, Volume 41(5), 832-847, Cambridge, Massachusetts, USA.
6. ROCHE, C., THYGESEN, K., & BAKER, E. (2017). “*Mine tailings storage: Safety is no accident—A rapid response assessment*. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal.
7. INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (ICMM). (2020). “*Global Industry Standard on Tailings Management”*.
8. GERRITSEN, H. (2005). “What happened in 1953? The Big Flood in the Netherlands in retrospect”. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 363(1831), 1271-1291. Delft, The Nederlands.
9. SANDHU, C.S., JAMES, A., SMALL, A., ALCORN, J. “Overview of the Process on Risk Informed Decision Making in Mining Dams / Tailings Storage Facilities-Practice Gaps in North America, Position Statement and Case Study”. Mining, Metallurgy & Exploration, 43, 1831–1845 (2026). https://doi.org/10.1007/s42461-026-01510-6
10. D'ANGREMOND, K. (2003). From Disaster to Delta Project: The Storm Flood of 1953. Terra et Aqua, 90, 3–10.

10 Bios

	**SANDHU, Chaitan S.** Senior Geotechnical Engineer at NewFields Canada with over 19 years of experience in dam and tailings engineering, risk assessment, and crisis management. He has served as Engineer/Designer of Record and Qualified Professional for TSF and dam projects across all lifecycle phases, and as Dam Safety Review Engineer on projects in Canada and internationally. His emergency response experience includes dam safety audits following the Mount Polley and Brumadinho failures, and dam emergency responses in Nova Scotia, Manitoba, and British Columbia. He is a member of the mining dams committee of CDA and co-chairs the RIDM guideline development for mining dams and TSFs for USSD and CDA since 2022.
	**LANCHOTTI, Andressa de O.** Public prosecutor at the Minas Gerais State Prosecutor’s Office (MPMG) in Brazil, with more than 26 years of experience and expertise in environmental law, natural resources governance, and conflict resolution. Since 1999, she has led complex legal actions and mediated high-impact environmental conflicts, particularly those involving mining, urban development, and environmental disasters. She also coordinated MPMG task forces in response to major mining dam failures between 2016 and 2020.

	**BOTHAM, Leon C.** President and Principal of NewFields Canada Inc. with over 35 years of experience in geotechnical and mining engineering. Mr. Botham specializes in TSF design, construction supervision, and risk management across diverse mining jurisdictions globally. He has led numerous TSF design projects and served on independent tailings review boards for major mining operations.
	**JAMES, Alistair T.** Principal Engineer at NewFields Canada Inc. specializing in TSF engineering, risk assessment, and closure planning. With over 30 years of experience, Mr. James has contributed to TSF design standards, risk assessment methodologies, and regulatory guideline development. He has extensive international experience across multiple mining jurisdictions. He is a member of the mining dams committee of CDA and chairs the RIDM guideline development group for USSD and CDA since 2022.
	**LLOYD, Tyrel T.** Senior Hydrotechnical Engineer and Partner at NewFields Canada Inc. with more than 25 years' experience and expertise in hydrological modeling, flood assessment, and TSF water management systems. Mr. Lloyd specializes in extreme precipitation analysis, hydraulic design, and climate change impact assessment for TSF facilities. He has contributed to numerous TSF design reviews and development of predictive water balances on mine waste projects across Canada.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

Como abordagens baseadas em risco melhoram a segurança de barragens

Adrián MORALES TORRES
Engenheiro Civil - iPresas

Ignacio ESCUDER BUENO
Engenheiro Civil - iPresas

Marco SILVA
Engenheiro Civil - iPresas

David MACÍAS
Engenheiro Civil - iPresas

RESUMO

A tomada de decisão baseada no risco tem vindo a afirmar-se como um pilar fundamental da gestão moderna da segurança de barragens. Esta apresentação reúne experiências em Moçambique, Colômbia e Espanha, demonstrando como a aplicação estruturada de metodologias de análise de risco contribui para o reforço da segurança, a otimização de recursos e o apoio à decisão.

São apresentados diferentes níveis metodológicos resultantes de estudos recentes e sistemas de gestão implementados internacionalmente. Em Moçambique, foi desenvolvida uma metodologia em dois níveis — combinando uma ferramenta de triagem com a Análise de Modos Potenciais de Rotura (PFMA) — aplicada a seis barragens através de workshops, conduzindo à criação de um sistema de gestão.

Na Colômbia, foram realizados estudos de avaliação quantitativa de risco (QRA) em várias barragens de EPM (Empresas Públicas de Medellín)., integrando modelação hidrológica, investigações geotécnicas e análises sísmicas. Em Espanha, o programa nacional abrange cerca de 370 barragens públicas, incluindo mais de 300 workshops de PFMA e estudos de QRA, apoiados por uma plataforma digital para priorização e acompanhamento do risco.

Por fim, são apresentadas lições aprendidas e a estrutura dos sistemas desenvolvidos, oferecendo um roteiro para adaptação noutros países.

ABSTRACT

Risk-informed decision-making has become a fundamental pillar of modern dam safety management. This presentation brings together experiences from Mozambique, Colombia, and Spain, demonstrating how the structured application of risk analysis methodologies contributes to improved safety, resource optimization, and decision-making.

Different methodological levels are presented, based on recent studies and internationally implemented management systems. In Mozambique, a two-level methodology was developed—combining a screening tool with Potential Failure Mode Analysis (PFMA)—and applied to six dams through workshops, leading to the development of a management system.

In Colombia, quantitative risk assessment (QRA) studies were carried out for several dams owned by EPM (Empresas Públicas de Medellín), integrating hydrological modelling, geotechnical investigations, and seismic analyses. In Spain, the national program covers around 370 public dams, including more than 300 PFMA workshops and QRA studies, supported by a digital platform for risk prioritization and monitoring.

Finally, key lessons learned and the structure of the developed systems are presented, providing a roadmap for adaptation in other countries.

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens desempenha um papel central na gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente em um contexto marcado pelo envelhecimento das infraestruturas, a crescente pressão sobre os sistemas hídricos e os efeitos das alterações climáticas. Estas infraestruturas são cruciais para o abastecimento de água, produção de energia, rega e controlo de cheias, sendo fundamentais para o desenvolvimento socioeconómico e a proteção de populações e bens.

Tradicionalmente, a avaliação da segurança de barragens baseou-se em abordagens determinísticas e normativas. No entanto, a complexidade crescente dos sistemas e as incertezas associadas ao comportamento das estruturas ao longo do tempo têm evidenciado limitações nestas abordagens. Nesse contexto, a tomada de decisão baseada no risco tem emergido como um pilar da gestão moderna da segurança, integrando a probabilidade de falhas e suas consequências, e apoiando a priorização de intervenções e otimização de recursos.

A implementação dessas abordagens apresenta desafios significativos, que variam conforme o contexto institucional, a disponibilidade de dados e o nível de maturidade técnica. Em países como Moçambique, onde muitas barragens têm mais de 50 anos e enfrentam limitações de monitorização e informação técnica, é essencial adotar metodologias estruturadas que permitam estabelecer uma base sólida para a gestão do risco. Em contextos mais avançados, como na Colômbia, a aplicação de análises quantitativas de risco, incluindo modelagem hidrológica, geotécnica e sísmica, permite uma avaliação mais aprofundada dos níveis de risco e das medidas de mitigação. Em Espanha, a necessidade de gerir um grande número de barragens, muitas envelhecidas e com características heterogêneas, levou ao desenvolvimento de sistemas integrados de gestão do risco, apoiados por ferramentas digitais e enquadramentos normativos específicos.

Este artigo reúne experiências de Moçambique, Colômbia e Espanha, representando diferentes níveis de aplicação da análise de risco. Desde ferramentas de triagem e análises qualitativas em Moçambique, até estudos quantitativos avançados e sistemas de gestão em Espanha, o artigo propõe uma abordagem metodológica estruturada em múltiplos níveis, permitindo sua adaptação a diferentes contextos. Por fim, são apresentadas as principais lições aprendidas, delineando um quadro transferível para outros países, contribuindo para o reforço da prática internacional na segurança de barragens.

2. CONCEITO DE RISCO E ABORDAGEM MULTINÍVEL NA GESTÃO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS

A segurança de barragens tem evoluído ao longo do tempo, deixando de ser baseada apenas em abordagens determinísticas para passar a integrar a análise de risco, que permite uma avaliação mais abrangente e precisa do comportamento dessas infraestruturas. Neste contexto, o risco pode ser entendido como a combinação entre a probabilidade de ocorrência de um evento adverso (como a falha de uma barragem) e as consequências que resultam dessa falha. Em outras palavras, o risco não se refere apenas à probabilidade de falha, mas também ao impacto potencial dessa falha, incluindo perdas humanas, danos econômicos e impactos ambientais.

As consequências de uma falha podem ser desastrosas, e por isso é crucial não apenas estimar a probabilidade de falha, mas também avaliar as consequências dessa falha, para que as intervenções sejam adequadas. A identificação dos modos de falha — ou seja, os mecanismos pelos quais a barragem pode falhar — é essencial, pois permite entender as vulnerabilidades das infraestruturas e orientar as ações subsequentes.

A abordagem multinível para a análise de risco em barragens baseia-se na articulação de diferentes metodologias, permitindo adaptar o nível de análise conforme as características e a complexidade de cada barragem. Essa abordagem reconhece que não existe uma única metodologia aplicável a todas as situações, sendo necessário ajustar o grau de complexidade conforme a disponibilidade de dados, a capacidade técnica e a criticidade das infraestruturas.

Como ilustrado na Figura 1, que apresenta os quatro níveis de análise de risco, a metodologia evolui de forma progressiva, começando com a triagem inicial, passando pela análise qualitativa para identificar os modos de falha, até a análise quantitativa para uma avaliação detalhada do risco. O processo culmina na implementação de sistemas de gestão do risco, que integram os resultados das análises e ajudam a apoiar a tomada de decisão contínua.

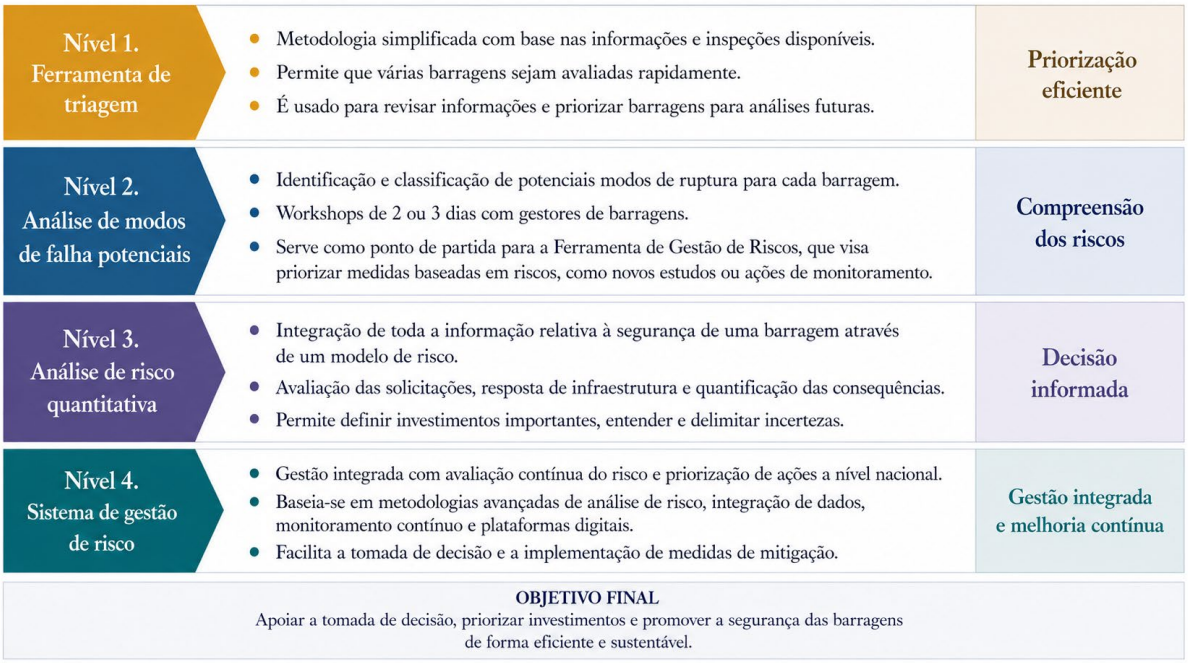


Figura 1 – Os quatro níveis de análise de risco aplicados na avaliação da segurança de barragens, desde a triagem inicial até a gestão integrada do risco.

Essa abordagem multinível possibilita adaptar as metodologias de acordo com as necessidades de cada contexto, permitindo que países ou sistemas de barragens em diferentes estágios de desenvolvimento implementem a análise de risco de forma progressiva e eficaz. Assim, a gestão do risco pode ser realizada de maneira flexível e escalonada, atendendo às especificidades de cada barragem e aos objetivos da avaliação.

3. APLICAÇÃO DO ENFOQUE MULTINÍVEL: CASOS DE ESTUDO

Este capítulo apresenta a aplicação prática do enfoque multinível de análise de risco em diferentes contextos internacionais, evidenciando como a adaptação do nível de

detalhe metodológico permite responder às necessidades específicas de cada sistema. Através dos casos de estudo de Moçambique, Colômbia e Espanha, ilustra-se a progressão desde abordagens mais qualitativas e de triagem até análises quantitativas avançadas e sistemas integrados de gestão do risco, demonstrando a flexibilidade e escalabilidade do modelo proposto.

3.1 Aplicação de ferramentas de triagem e PFMA em Moçambique

O caso de Moçambique representa a aplicação dos níveis iniciais do enfoque multinível, combinando uma ferramenta de triagem baseada no risco com uma análise qualitativa e semi-quantitativa de modos de falha potenciais. Esta abordagem permitiu estruturar uma primeira avaliação sistemática da segurança de seis barragens, num contexto caracterizado por limitações de informação, necessidades de reforço institucional e diferentes níveis de maturidade técnica.

3.1.1 Ferramenta de triagem baseada no risco

A ferramenta de triagem baseada no risco constitui um instrumento estratégico para apoiar a gestão da segurança de barragens, permitindo avaliações expeditas, identificação de vulnerabilidades e priorização de ações futuras. Desenvolvida especificamente para o contexto moçambicano, integra perigos hidrológicos e sísmicos, vulnerabilidades estruturais, condições operacionais e consequências potenciais, incluindo ainda um Índice de Incerteza associado à qualidade da informação disponível.

A ferramenta baseia-se em metodologias reconhecidas internacionalmente, como as do USBR [1] e das normas brasileiras de segurança de barragens [2], incorporando adaptações específicas ao contexto moçambicano. Entre estas destacam-se a inclusão de um Índice de Incerteza, a consideração da condição da barragem e das barragens a montante como fatores de risco, bem como a integração da preparação para emergências no Índice de Consequências.

A Figura 2 ilustra a relação entre a Probabilidade de Falha e as Consequências.

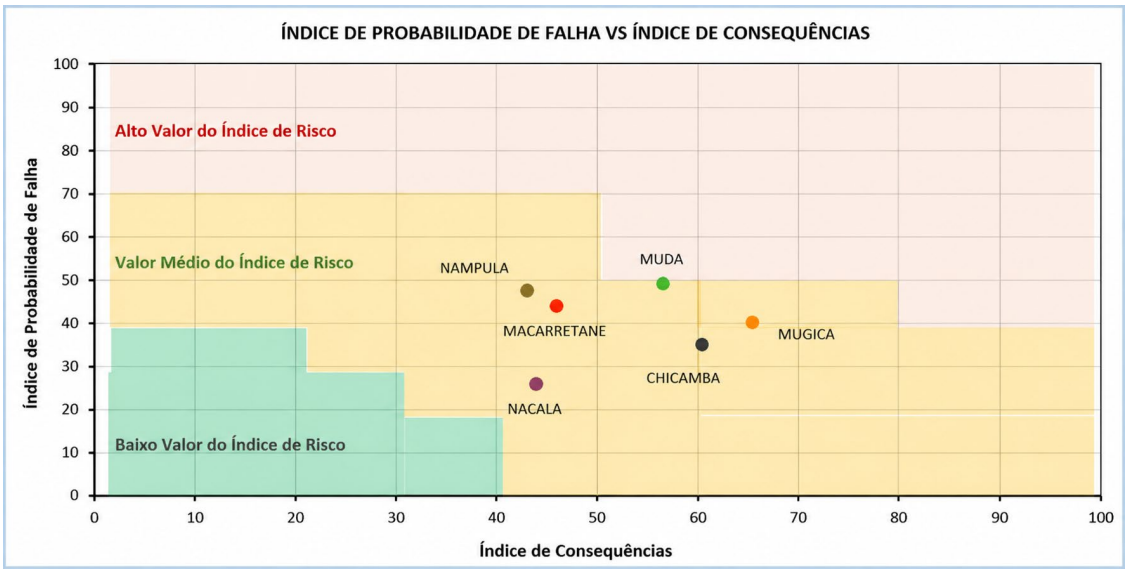


Figura 2 – Índice de probabilidade de falha versus Índice de consequências.

3.1.2 Análise de Modos de Falha Potenciais

Uma avaliação de risco abrangente das seis barragens piloto foi realizada utilizando uma análise de risco semi-quantitativa através de workshops participativos. A metodologia empregada baseou-se em abordagens específicas de avaliação de risco para barragens, conforme descrito nas Diretrizes Técnicas publicadas pela SPANCOLD [4], USACE [5] e na metodologia detalhada em [6]. Estes workshops reuniram especialistas nacionais e internacionais, pessoal de projeto e operação de barragens, e representantes de organizações moçambicanas responsáveis pela segurança das barragens. Utilizando mais de 20 anos de experiência e ferramentas especializadas desenvolvidas pela iPresas, a metodologia ofereceu uma estrutura organizada para identificar vulnerabilidades e recomendar medidas de segurança para infraestruturas hidráulicas.

A avaliação combinou o compartilhamento colaborativo de conhecimentos durante os workshops com uma revisão minuciosa dos dados existentes, fornecendo insights valiosos sobre o estado atual da segurança das barragens. Esta abordagem participativa foi fundamental para garantir uma avaliação abrangente e para moldar futuras estratégias de gestão do risco.

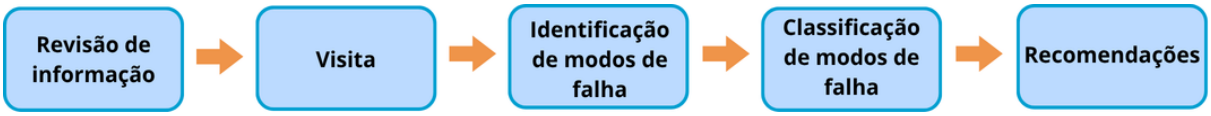


Figura 3 – Metodologia para a análise de risco semi-quantitativa.

Os workshops foram organizados em várias missões, cada uma consistindo em visitas a barragens selecionadas para análise. Essas missões foram realizadas em colaboração com as autoridades regionais e locais, envolvendo visitas a diferentes barragens. O objetivo principal dessas missões foi envolver especialistas, operadores locais e representantes das partes interessadas no processo de avaliação de risco, assegurando uma abordagem colaborativa e minuciosa na gestão da segurança das barragens. A análise contou com a participação de aproximadamente 64 profissionais, o que enfatizou o papel crítico da colaboração entre as diferentes partes no desenvolvimento de um diagnóstico abrangente e na definição de ações de mitigação.

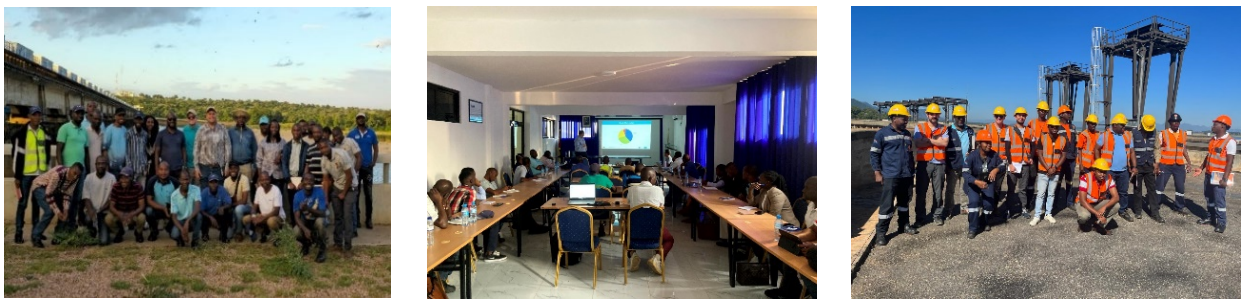


Figura 4 – Exemplo de um workshop presencial.

3.1.3 Resultados da análise de modos de falha potenciais

A classificação comparativa de risco das barragens é apresentada na Figura 5, que ilustra como diferentes modos de falha de cada barragem são categorizadas em zonas de alto e médio risco. A análise revelou que algumas barragens apresentam altos níveis de risco devido a fatores como eventos passados, probabilidade de falha e potencial de impacto social e ambiental. Por outro lado, barragens com menores níveis de risco apresentam características como reabilitação prévia ou baixos impactos

potenciais, embora ainda necessitem de monitoramento contínuo. A necessidade de manutenção e monitoramento aprimorados foi destacada, especialmente em infraestruturas com risco social elevado, o que sublinha a importância de ações preventivas e estratégias de mitigação de risco.

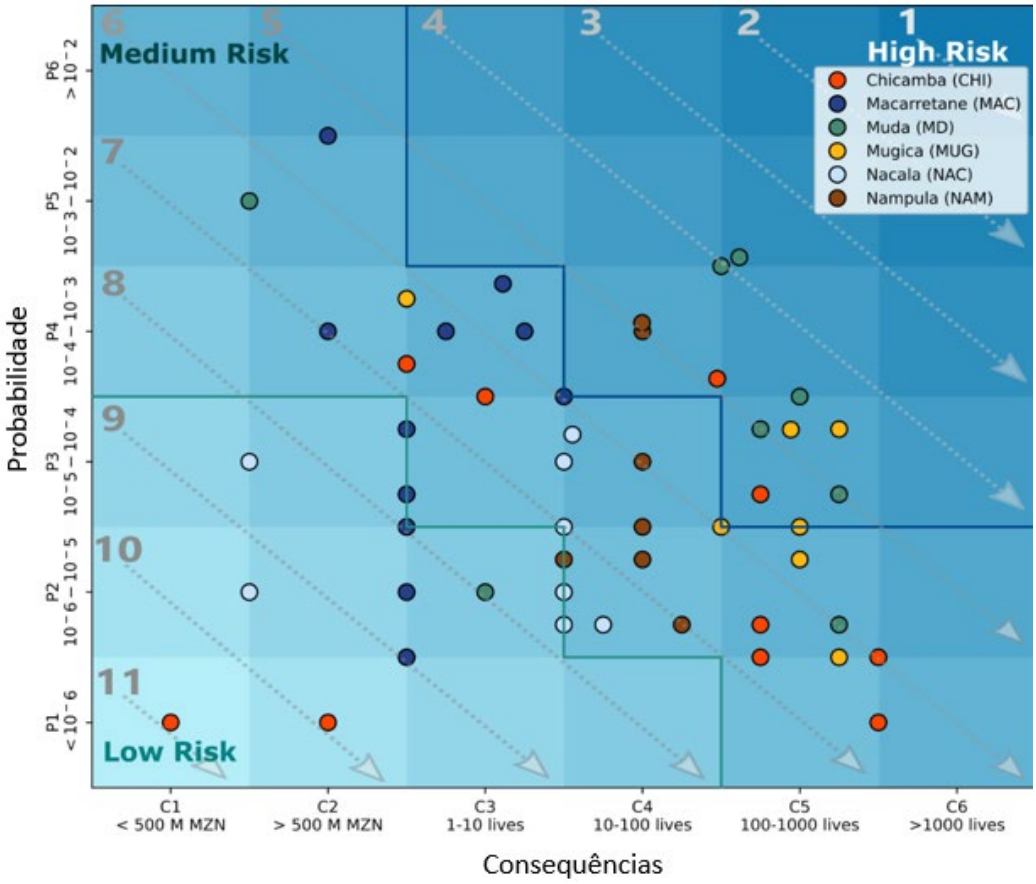


Figura 5 – Classificação semi-quantitativa dos modos de falha de todas as barragens e distribuição dos níveis de prioridade.

Para as seis barragens, um total de 44 modos de falha foram identificados durante os workshops de análise de modos potenciais de falha.

A análise demonstra uma forte consistência entre os dois métodos de classificação de risco, validando a confiabilidade da avaliação.

3.1.4 Roteiro de priorização e planejamento de medidas de mitigação

Neste contexto, foi desenvolvido um Roadmap para priorizar e planear as medidas definidas para cada barragem, servindo como enquadramento para futuras ações de reforço da segurança. O roadmap, apresentado na Figura 6, organiza as medidas segundo níveis de prioridade, associando as ações mais urgentes aos modos de falha de maior risco, enquanto as restantes são distribuídas entre médio e longo prazo.

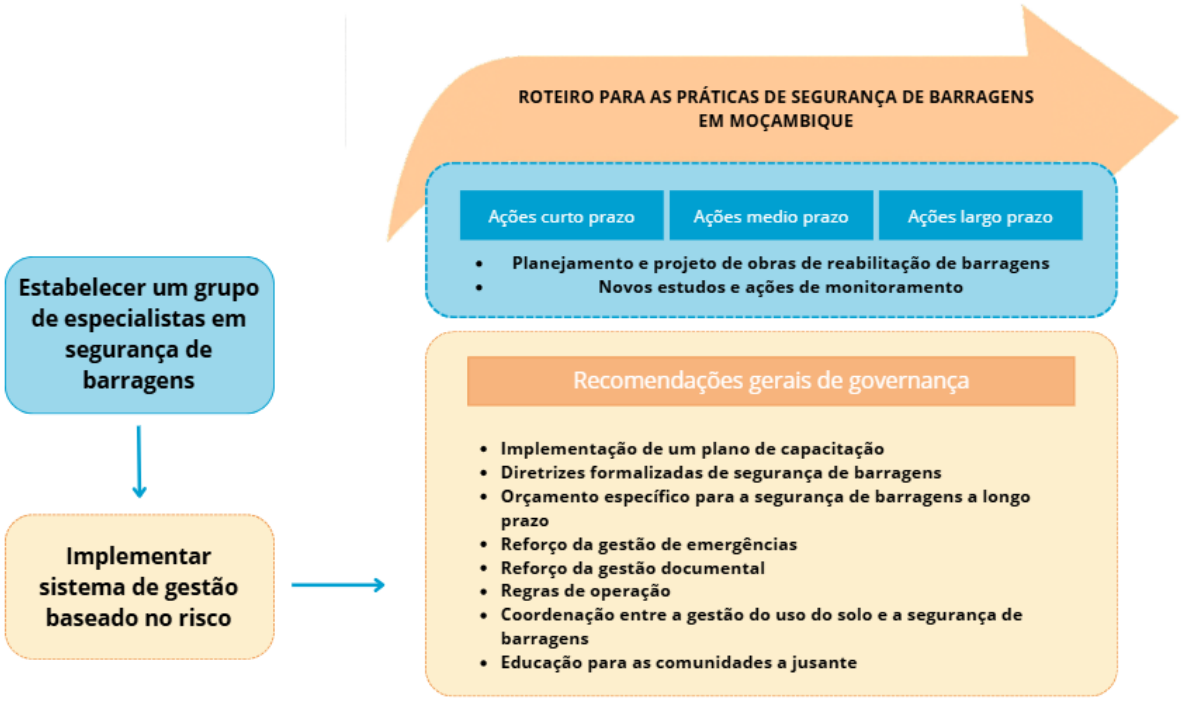


Figura 6 – Roteiro proposto para desenvolver um programa de segurança de barragens baseado em risco.

3.2 Análise quantitativa de risco na Colômbia

Neste capítulo, o foco principal é a análise quantitativa de risco (Nível 3) aplicada a barragens na Colômbia, sob a responsabilidade da EPM (Empresas Públicas de Medellín). Além da análise quantitativa, também se realizou o nível 2, com a análise de modos de falha potenciais (PFMA), utilizando uma abordagem integrada para fornecer uma avaliação mais detalhada e robusta dos riscos.

É importante destacar que, no caso da EPM, a análise foi realizada em barragens específicas, com foco na segurança e operação dessas infraestruturas. A combinação de modelagem hidrológica e estrutural ofereceu uma compreensão mais profunda do comportamento das barragens, complementando a análise qualitativa com dados quantitativos.



Figura 7 – Fotografias de algumas das barragens de EPM.

A Figura 8 apresenta um exemplo da implementação de um sistema de gestão de risco aplicado a barragens, integrando os diversos passos constituintes de uma revisão de segurança e atualização contínua da informação ao longo do tempo.

O processo foi inicialmente apoiado por visitas técnicas e por uma revisão e atualização detalhada dos estudos de base de cada barragem. Esta fase incluiu análises hidrológicas, avaliação do comportamento hidráulico dos órgãos de descarga, investigações geotécnicas, análises de ameaça sísmica, avaliação estrutural, revisão dos dados de auscultação e do comportamento das barragens, análises de rotura de barragens, modelação hidráulica bidimensional a jusante, revisão dos planos de emergência, cálculo das consequências sociais e económicas

e, em alguns casos, quantificação da fiabilidade das comportas e atualização das regras de operação.

Estes estudos permitiram estabelecer uma base técnica robusta para a posterior identificação dos modos de falha potenciais (PFMA) e para a sua classificação em função da probabilidade de ocorrência e das consequências associadas.



Figura 8 – Processo de avaliação de segurança e risco aplicada em EPM, Colombia.

Os resultados dos modelos hidráulicos a jusante foram a base para estimar as consequências sociais e econômicas a jusante de cada barragem para cada um dos cenários simulados, sendo esta uma das chaves do processo de avaliação de riscos. Nesse sentido, essa avaliação permitiu identificar os pontos mais críticos para os riscos de inundação a jusante das barragens.

Esses resultados foram introduzidos em um modelo quantitativo de risco desenvolvido para cada barragem, com base nas recomendações da SPANCOLD [7] e CWC [3], e utilizando o software iPresas Calc. Este modelo combina as probabilidades de perigosidade (inundações e terremotos), a probabilidade de diferentes níveis nos reservatórios, a probabilidade de falha dos principais modos de falha considerados nos modelos e as consequências sociais e econômicas a jusante, através de uma árvore de eventos, como mostrado no exemplo da Figura 9. Esses modelos de risco permitem uma avaliação completa da segurança da barragem, incluindo todos os aspetos de manutenção, operação e comportamento nos dados de entrada.

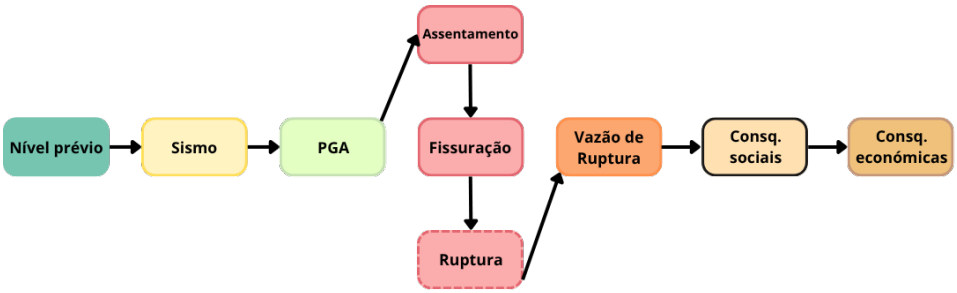


Figura 9 – Exemplo da arquitetura do modelo de risco sísmico para a barragem de Playas.

A avaliação do risco à escala de portefólio representa uma evolução natural das análises realizadas individualmente para cada barragem, constituindo um elemento fundamental na governação do risco em organizações responsáveis pela gestão de múltiplas infraestruturas. Esta abordagem permite integrar os resultados das diferentes barragens num enquadramento comum, facilitando comparações homogéneas e a identificação das infraestruturas que mais contribuem para o risco global do sistema, em alinhamento com recomendações internacionais como as da ICOLD (2015), SPANCOLD (2012), ANCOLD (2022) e USACE & USBR (2019).

A partir desta visão integrada, a análise de risco apoia a priorização de investimentos e intervenções, tanto estruturais como não estruturais, permitindo definir estratégias progressivas de redução do risco e planos de investimento adaptáveis ao longo do tempo, otimizando simultaneamente o planeamento técnico e económico.

De forma geral, os estudos realizados evidenciaram que as barragens avaliadas apresentam condições de segurança adequadas, sustentadas por critérios de projeto robustos, bom conhecimento do comportamento das estruturas através dos sistemas de auscultação, práticas operacionais consolidadas e programas de conservação e manutenção adequadamente implementados. Adicionalmente, a existência de Planos de Ação de Emergência e a atenção contínua dedicada às atividades de manutenção e às medidas resultantes das revisões de segurança contribuem para reforçar os níveis de proteção existentes.

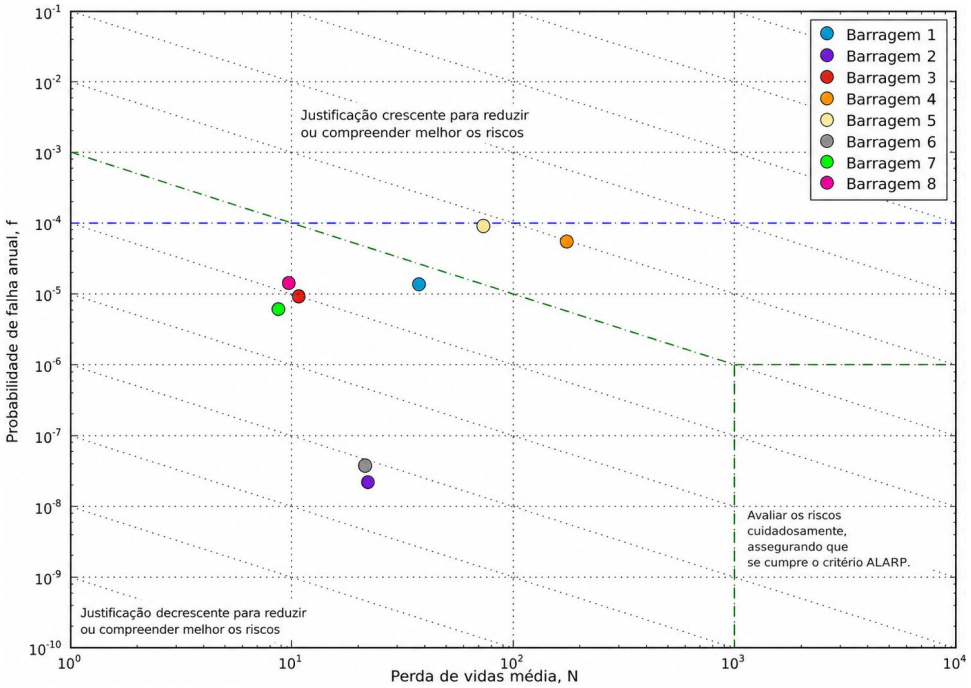


Figura 10 – Resultados da avaliação de risco quantitatica para o conjunto das barragens de EMP na situação base.

3.3 Nível 4: Sistema de gestão do risco em Espanha

O sistema de gestão do risco em Espanha é um exemplo de gestão integrada, com uma abordagem de avaliação contínua do risco e priorização de ações a nível nacional. Este sistema baseia-se em metodologias avançadas de análise de risco, incluindo a integração de dados, monitorização contínua e plataformas digitais, facilitando a tomada de decisão e a implementação de medidas de mitigação.

Enquanto os primeiros níveis, descritos anteriormente, se focam em ferramentas de triagem e em análises qualitativas e quantitativas, o sistema implementado em Espanha vai além da quantificação do risco, integrando os resultados das análises num processo contínuo de gestão, acompanhamento e priorização de investimentos à escala nacional. No âmbito deste projeto, foram já identificados mais de 3265 modos de falha, compiladas cerca de 4020 recomendações e propostas de melhoria, e envolveram-se mais de 3134 participantes nas sessões de identificação de modos de falha, refletindo a dimensão e abrangência do programa implementado.

3.3.1 Estrutura de um Sistema de Gestão

O objetivo principal do sistema integrado de gestão do risco desenvolvido é fornecer suporte à tomada de decisões sobre a segurança das barragens, de maneira justificada, eficiente e planejada, integrando investimentos a curto, médio e longo prazo, enquanto considera as incertezas inerentes às alterações climáticas, contribuindo para uma sociedade mais resiliente frente a desastres.

Para implementar este sistema, a metodologia de análise de risco está sendo aplicada nas barragens estaduais por meio das Confederações Hidrográficas. Os resultados dessa análise permitem realizar uma avaliação integral das barragens, além de planejar os investimentos necessários para reforçar sua segurança. Assim, a comparação dos resultados de todas as barragens facilita o planejamento dos investimentos tanto a nível regional quanto nacional.

A aplicação do sistema de gestão do risco complementa os programas tradicionais de segurança previstos nas Normas Técnicas de Segurança de Barragens, integrando uma perspetiva de risco, priorização e justificação das decisões, sem substituir as abordagens tradicionais.

Vale ressaltar que o sistema de gestão do risco desenvolvido está alinhado com as melhores práticas internacionais em segurança de barragens, incorporando a experiência de países como Estados Unidos, França, Canadá e Austrália.

O processo de implementação do sistema de gestão de riscos teve início em julho de 2021, com o desenvolvimento da metodologia e da plataforma digital, esta última assumindo um papel fundamental como ferramenta de suporte. Durante o ano seguinte, foram estabelecidos contratos nas Confederações do Guadalquivir, Júcar, Segura e Ebro, dando início à aplicação da análise de riscos através de uma barragem piloto em cada confederação, com o objetivo de capacitar as empresas contratadas para replicar o processo nas restantes barragens das respetivas regiões.

Os esforços concentraram-se, ao longo do ano seguinte, na identificação dos modos de falha nas 178 barragens dessas confederações, bem como na formação contínua das equipas envolvidas. Posteriormente, procedeu-se ao desenvolvimento dos modelos de risco quantitativo, tendo sido obtidos resultados de risco para o conjunto das barragens ao longo da fase seguinte do projeto.

Em março de 2024, a análise de risco foi expandida para mais 135 barragens nas Confederações Hidrográficas do Duero, Tajo, Guadiana, Miño-Sil, Cantábrico e da

Mancomunidade dos Canais do Taibilla, seguindo a mesma metodologia aplicada anteriormente. Com isso, um total de 313 barragens sob titularidade estatal passaram a ser sujeitas ao processo de avaliação e gestão de riscos.

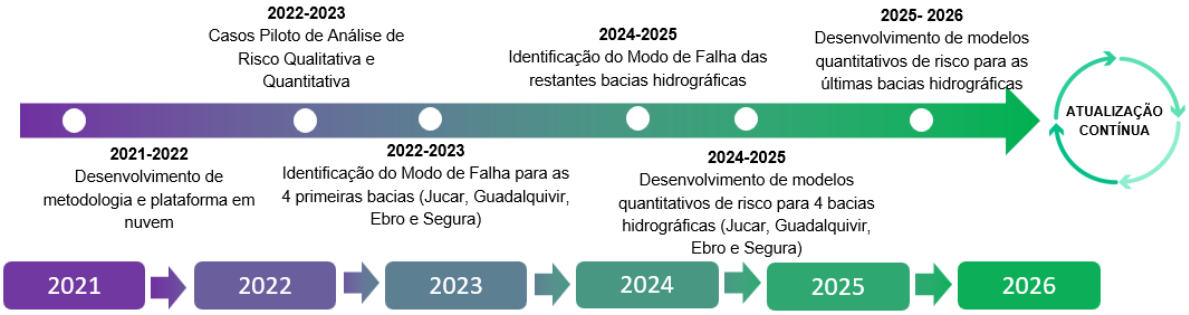


Figura 11 – Esquema geral para o desenvolvimento de um sistema de gestão.

Nesse sentido, este sistema permite ter uma visão global da segurança de uma barragem, integrando os dados e resultados fornecidos pelas atividades e documentos base da gestão da segurança de barragens, como as Normas de Exploração, Revisões de Segurança, Planos de Emergência e Relatórios anuais de Comportamento, conforme mostrado na Figura 12, e desenvolvendo assim um sistema de gestão da segurança informado por risco. Por isso, uma vez implementado o sistema, e para garantir uma gestão adequada, é importante revisá-lo e atualizá-lo continuamente.



Figura 12 – Relação entre o sistema de gestão informado em riscos e o resto das atividades de segurança de barragens.

3.3.2 Análise de risco Semi-Quantitativa

Nos workshops de identificação de modos de falha para cada barragem, os participantes propuseram modos de falha potenciais, que foram discutidos e classificados com base na probabilidade e nas consequências da falha. Um total de 3.260 modos de falha foram identificados, dos quais 55% foram classificados como

modos de falha por rutura da barragem e 45% como falhas operacionais que não levam à rutura. Os modos de falha mais comuns estavam relacionados ao carregamento hidrológico, falhas nas obras de descarga e mecanismos de instabilidade, como erosão interna e deslizamento. Outros modos de falha incluíam ações antrópicas, como vandalismo e falhas no fornecimento de energia.

Após a identificação e classificação, foram propostas medidas de melhoria em quatro categorias: 21% das medidas são estruturais, envolvendo intervenções de design, investimento e planejamento, como obras civis e aquisição de equipamentos; 26% são novas ações de estudo e redução de incertezas, voltadas para ampliar o conhecimento sobre as condições da barragem e suas infraestruturas; 24% dizem respeito a melhorias em manutenção, vigilância e instrumentação, para fortalecer o monitoramento da barragem; e 29% são ações de governança, com medidas institucionais e estratégicas para aprimorar a gestão de segurança, coordenação, planejamento e continuidade das equipes responsáveis pela segurança.

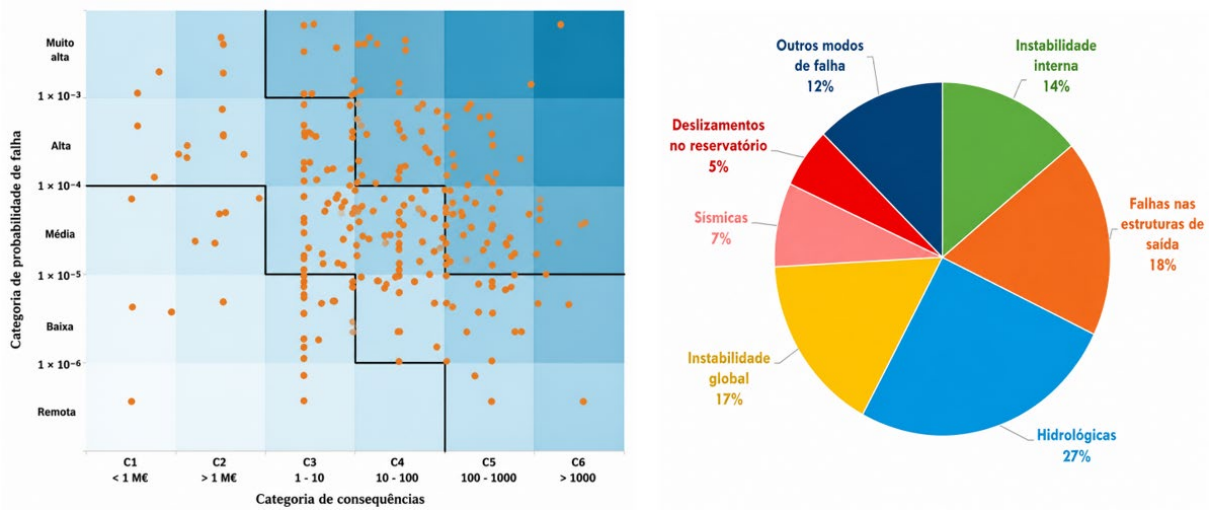


Figura 13 – (Esq.) Resultados da análise de risco semi-quantitativa das barragens estudadas e (Dta.) tipos de modos de falha identificados.

Um total de mais de 4.400 recomendações e/ou propostas de melhoria foram coletadas, resultando em uma média de aproximadamente 14 recomendações e/ou propostas por barragem. Essas recomendações estão associadas aos diferentes modos de falha e são priorizadas por meio da plataforma GARI (Gestão, Análise de Risco e Investimentos), com base nas diagonais iso-risco da matriz semi-quantitativa, de modo que as recomendações que afetam modos de falha classificados como de alto risco recebem uma prioridade maior do que aquelas que afetam apenas modos de falha de baixo risco.

3.3.3 Análise de risco Quantitativa

Com base nos modos de falha identificados e sua classificação, foi desenvolvido um modelo quantitativo de risco para cada barragem, implementado no software iPresas. Este modelo permite estimar a probabilidade de falha da barragem e as consequências sociais e econômicas desse modo de falha.

O cálculo do risco quantitativo oferece uma visão integrada da segurança da barragem, incorporando de forma coerente informações e resultados das diversas atividades e documentos chave que suportam sua gestão, como Regras Operacionais, Avaliações de Segurança, Planos de Ação de Emergência e Relatórios de Desempenho.

Os resultados obtidos são comparados com critérios internacionais de tolerabilidade de risco para avaliar se a situação atual está em conformidade com as recomendações

de órgãos como USACE e USBR (Estados Unidos), o Comitê Nacional de Grandes Barragens da Austrália (ANCOLD) e a Comissão Central de Águas da Índia (CWC).

Os resultados de risco incremental para as primeiras 108 barragens analisadas são apresentados, considerando o cenário inicial (ano de 2025), que inclui um cenário comparativo para todas as barragens. Neste cenário, foram gerados hidrogramas utilizando taxas de variação nas precipitações máximas diárias anuais associadas a projeções de mudança climática para 2025, níveis históricos de referência e consequências estimadas com base nas condições atuais das áreas a jusante de cada barragem.

Para todas as barragens analisadas, o risco hidrológico foi avaliado. Além disso, com base na classificação semi-quantitativa anterior, outros modos de falha classificados como de risco alto ou médio, com consequências sociais significativas, também foram analisados. A Figura 14 apresenta este gráfico de fN, detalhado por mecanismo de falha, mostrando que, para a maioria das barragens, o modo de falha predominante corresponde ao transbordamento.

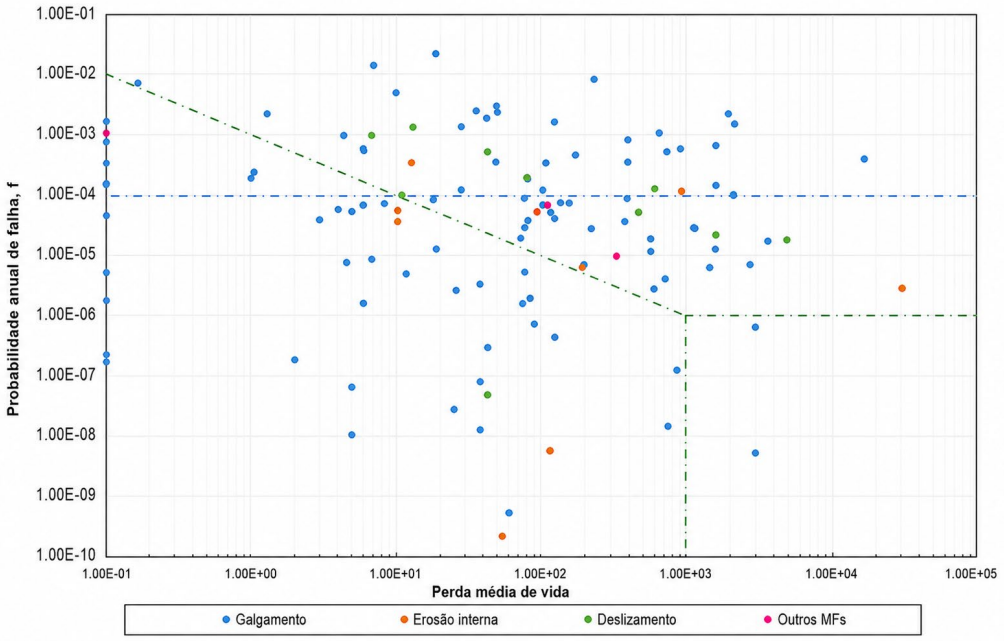


Figura 14 – Risco incremental de todas as barragens por mecanismo de modo de falha no Cenário Inicial (2025) num gráfico fN.

Com base neste enquadramento, foi desenvolvida uma metodologia abrangente baseada na análise de risco para incorporar estes impactos na gestão do risco de barragens, desde o tratamento da estimativa do risco até à identificação da sequência de implementação de medidas corretivas.

Neste contexto, o efeito das Alterações Climáticas é incorporado no modelo de risco através da definição dos seguintes casos ou cenários:



Figura 15 – Esquema dos cenários utilizados no modelo de risco.

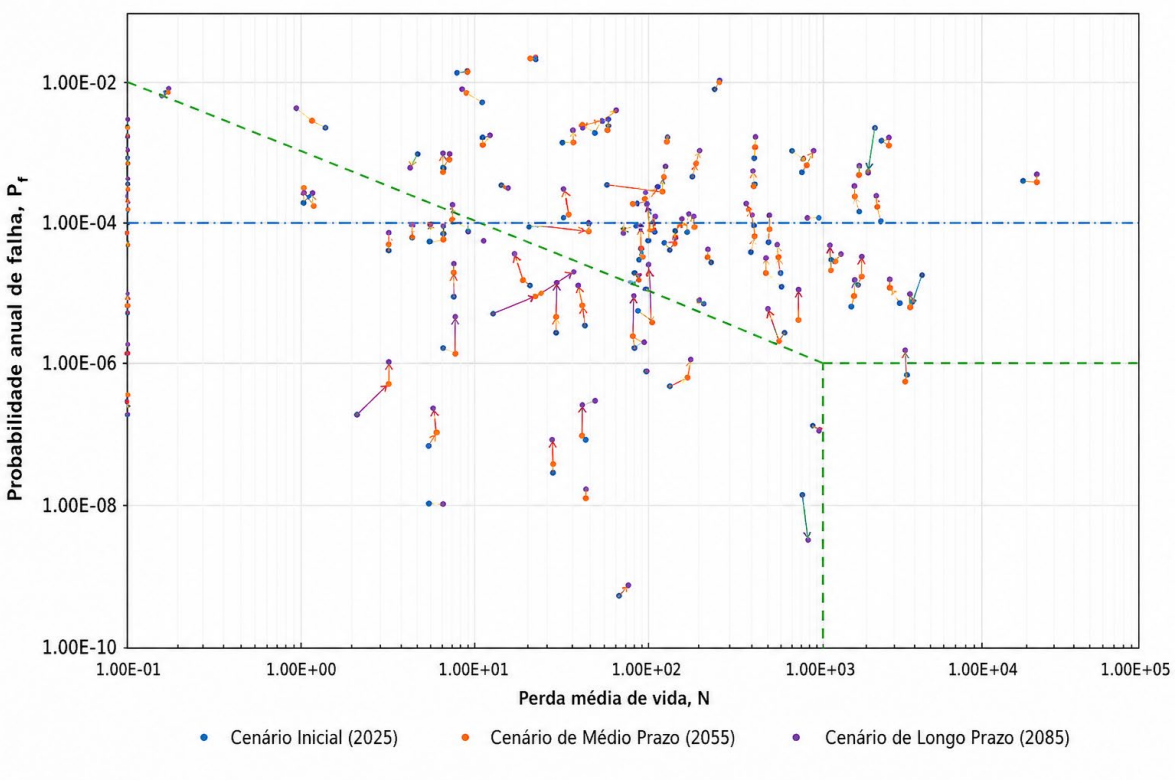


Figura 16 – Avaliação do risco incremental no Cenário Inicial (2025), Cenário de Médio Prazo (2055) e Cenário de Longo Prazo (2085).

Como observado no gráfico anterior, as Alterações Climáticas têm impacto no risco, aumentando, em muitos casos, a probabilidade de falha das barragens como resultado do aumento esperado dos caudais de ponta associados aos eventos de cheia. Adicionalmente, em alguns casos observa-se um deslocamento horizontal dos pontos, associado às projeções de crescimento populacional nas zonas a jusante.

Além da avaliação do risco para o Caso Base, o Cenário Inicial (2025) e os cenários futuros de 2055 e 2085, foram também realizadas diversas análises de sensibilidade, com o objetivo de avaliar se a incerteza inerente aos dados introduzidos no modelo de risco influencia significativamente os valores de risco estimados e, consequentemente, as conclusões relativas aos critérios de tolerabilidade do risco.

Entre as análises de sensibilidade realizadas, destaca-se a avaliação do impacto dos Planos de Emergência. Esta análise teve como objetivo quantificar a influência da aprovação e implementação destes planos no risco, representando uma melhoria dos procedimentos de resposta a emergências, bem como um reforço da coordenação e comunicação com a população através de sistemas de aviso e alerta.

3.3.4 Priorização de investimentos

Os resultados da classificação semi-quantitativa de todos os modos de falha nas barragens são usados para priorizar novos estudos, reforçar o sistema de auscultação e planejar ações de manutenção.

A metodologia proposta para a priorização de investimentos, com base nos resultados de risco, está resumida na Figura 17. Inicialmente, os modos de falha identificados são classificados de forma semi-quantitativa durante o workshop da análise qualitativa. A partir dessa classificação, decide-se quais modos de falha serão submetidos à análise quantitativa de risco, caso o risco seja alto ou médio, exigindo uma análise mais detalhada para avaliar a necessidade de implementar ações de mitigação.

Os resultados quantitativos de risco de todas as barragens são comparados para priorizar as ações propostas, que podem incluir desde grandes reabilitações até medidas não estruturais, como mudanças na operação ou melhorias na gestão de emergências. Esta priorização leva em consideração tanto a redução de risco proporcionada por cada medida quanto os seus custos ao longo da vida útil, aplicando os princípios de eficiência e equidade. Além disso, a distribuição das medidas ao longo do tempo será ajustada com base nos recursos disponíveis, considerando também a evolução do risco, como o impacto das mudanças climáticas ou as alterações demográficas.

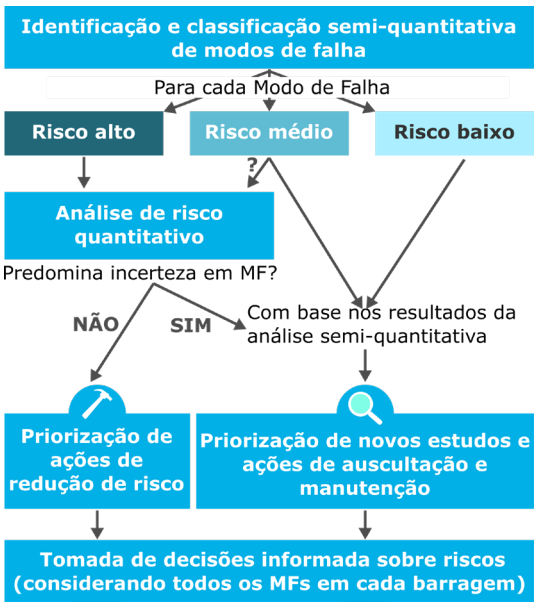


Figura 17 – Esquema de metodologia proposta para a tomada de decisões.

Com o objetivo de obter essas duas sequências de priorização, utiliza-se a Plataforma GARI (Gestão, Análise de Riscos e Investimentos) da DGA. Esta plataforma permite a obtenção de sequências de implementação de medidas a partir dos resultados de risco das diferentes barragens e dos modos de falha identificados.

Como mostrado na Figura 18, os grupos de trabalho de cada uma das Confederações são responsáveis por subir os resultados da análise de riscos de cada barragem para a Plataforma GARI. Nessa plataforma, esses resultados são combinados a nível de Confederação e estatal para obter duas sequências de priorização: uma para ações de redução de risco e outra para novos estudos e ações de manutenção. Dessa forma,

essas duas sequências são calculadas seguindo a metodologia explicada anteriormente.



Figura 18 – Plataforma GARI para gestão de riscos.

3.4 Análise comparativa e síntese

A análise comparativa das abordagens aplicadas em Moçambique, Colômbia e Espanha revela a eficácia de uma metodologia de gestão do risco baseada em múltiplos níveis, adaptáveis a diferentes contextos. Em Moçambique, iniciou-se com ferramentas de triagem e análise qualitativa, essenciais para um contexto com limitações de dados e infraestrutura técnica.

Na Colômbia, a abordagem avançou para uma análise quantitativa de risco, utilizando modelos hidrológicos, geotécnicos e sísmicos para uma avaliação mais detalhada das barragens.

Já em Espanha, a abordagem ultrapassou a análise quantitativa, aplicando um sistema integrado de gestão do risco à escala nacional, com apoio de uma plataforma digital que permite a monitorização contínua e a priorização das intervenções em um grande número de barragens. Embora as abordagens variem em complexidade, todas destacam a importância da participação das partes interessadas, da adaptação às condições locais e da capacidade de evoluir conforme o aumento da maturidade técnica e institucional. A experiência mostra que a aplicação progressiva de ferramentas, começando por abordagens mais simples e avançando para análises mais detalhadas, é crucial para a eficácia e sustentabilidade da gestão da segurança de barragens.

4. CONCLUSÕES

O presente artigo demonstra como a aplicação estruturada de metodologias de análise de risco constitui um elemento fundamental para reforçar a segurança de barragens e apoiar a tomada de decisão em diferentes contextos institucionais e níveis de maturidade técnica. A integração de experiências em Moçambique, Colômbia e Espanha evidencia que a gestão eficaz do risco não depende de uma única abordagem, mas sim da articulação coerente de diferentes níveis metodológicos, adaptados às características e necessidades de cada contexto.

Neste sentido, é possível observar uma progressão clara desde níveis de análise menos complexos e predominantemente qualitativos, como no caso de Moçambique, onde a aplicação de ferramentas de triagem e análises semi-quantitativas suportadas por workshops de identificação de modos potenciais de rotura (PFMA) permitiu estabelecer uma base estruturada de avaliação da segurança, até abordagens mais avançadas e quantitativas, como as desenvolvidas na Colômbia e em Espanha, baseadas em análises quantitativas de risco (QRA) que integram modelação hidrológica, estudos geotécnicos e análises sísmicas. Paralelamente, observa-se também a evolução para níveis mais abrangentes de aplicação, incluindo escalas macro de governação, como no caso do sistema nacional implementado em Espanha, onde a gestão do risco é utilizada como ferramenta central para a priorização de investimentos, a gestão integrada de infraestruturas e o apoio à decisão a longo prazo.

Os resultados obtidos nos diferentes casos de estudo evidenciam que a identificação estruturada de modos de falha constitui um elemento central da análise de risco, permitindo orientar de forma eficaz as fases subsequentes de avaliação e a definição de medidas de mitigação. A aplicação de modelos quantitativos, quando suportada por dados adequados, permite aprofundar a avaliação do risco, estimar o impacto das medidas de redução e verificar o cumprimento de critérios internacionais de tolerabilidade. Por outro lado, os sistemas de gestão do risco demonstram o seu valor ao permitir integrar informação diversa, monitorizar continuamente o risco e apoiar decisões de forma transparente e fundamentada.

De forma transversal, destaca-se o papel crítico da colaboração multidisciplinar, do envolvimento dos operadores e da utilização de ferramentas estruturadas na construção de diagnósticos robustos e na implementação de medidas eficazes. Adicionalmente, a crescente incorporação de fatores como o envelhecimento das infraestruturas e os efeitos das alterações climáticas reforça a necessidade de abordagens dinâmicas e adaptativas na gestão da segurança de barragens.

Com base nas experiências analisadas, o artigo propõe uma abordagem multinível para a gestão da segurança de barragens, estruturada em quatro componentes principais: (i) triagem inicial para priorização, (ii) análise qualitativa baseada em PFMA, (iii) análise quantitativa de risco aplicada de forma seletiva e (iv) implementação de sistemas de gestão do risco. Esta abordagem permite adaptar o nível de detalhe e complexidade ao contexto específico, facilitando a sua aplicação progressiva e garantindo consistência metodológica.

Por fim, conclui-se que a adoção de uma abordagem baseada no risco contribui não só para o reforço da segurança das barragens, mas também para uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos, promovendo a resiliência das infraestruturas e a

proteção das populações. O quadro proposto constitui um roteiro transferível para outros países e organizações que pretendam evoluir para modelos de gestão mais robustos, integrados e orientados para o risco, incluindo no caso particular das barragens de rejeitos, onde os desafios técnicos, operacionais e ambientais exigem abordagens ainda mais exigentes e multidisciplinares.

5. PALAVRAS-CHAVE

Risco, Barragens, Segurança, Gestão, Decisão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] USBR, United States Bureau of Reclamation, 2011. Dam Safety Public Protection Guidelines – A Risk Framework to Support Dam Safety Decision-Making, United States.

[2] J. M. Alonso, R. Ribeiro, I. Escuder, I. Guerra, M. Sánchez, and A. Morales. (2018). “Plan of Strategic Actions for the Rehabilitation of 164 dams of Brazil based on the Brazilian Risk-based Methodology,” in 26th International Commission on Large Dams World Congress.

[3] CWC, Central Water Commission. Ministry of Water Resources India, 2019. Guidelines for Assessing and Managing Risks Associated with Dams, India.

[4] SPANCOLD, Spanish Committee of Large Dams, 2012. Risk Analysis applied to the dam safety. Technical Guide Nº 8, vol. 1, Spain.

[5] USACE, United States Army Corps of Engineers, 2014. Safety of dams – Policy and procedures. Engineering and design, United States.

[6] I. Escuder-Bueno, A. Morales-Torres, F. D. García-Brook & H. C. Yarritu-Sánchez. (2024). Beyond conventional practices: Enhanced methodology for dam potential failure modes screening. 92nd ICOLD Annual Meeting – New Delhi, India.

[7] SPANCOLD. 2012. Risk analysis as applied to dam safety. Technical Guide on Operation of Dams and Reservoirs, Vol. 1. Madrid: Professional Association of Civil Engineers. Spanish National Committee on Large Dams.

[8] USACE. 2014. Safety of Dams - Policy and Procedures. Engineering and De-sign. United States Army Corps of Engineers. Washington D.C.: United States Army Corps of Engineers.

[9] USBR. 2011. Dam Safety Public Protection Guidelines - A Risk Framework to Support Dam Safety Decision-Making, United States Bureau of Reclamation.

	**Adrián MORALES TORRES** Dr. em Engenharia Civil, com mais de 15 anos de experiência em segurança de barragens e análise de risco em mais de 200 infraestruturas a nível internacional. Lidera a implementação de sistemas de gestão do risco em mais de 300 barragens em Espanha e colabora com governos e entidades globais. Autor de mais de 120 publicações e especialista em GISTM.
	**Ignacio ESCUDER BUENO** Dr. em Engenharia Civil, Professor Catedrático na UPV e sócio fundador da iPresas. Com quase 30 anos de experiência internacional, é especialista em segurança de barragens, análise de risco e modelação numérica. Liderou projetos em todo o mundo e colaborou com instituições como BID, Banco Mundial e ICOLD. Autor de mais de 150 publicações.
	**Marco SILVA** MSc em Engenharia Civil pela FEUP (Portugal), com período académico na UPV (Espanha). Atualmente é Engenheiro de Projetos na área de análise de riscos aplicada a barragens e infraestruturas hidráulicas. Participa em projetos internacionais, como o NWRDP em Moçambique. Conta com experiência prévia em obra civil no Quénia e em desenvolvimento de negócio.
	**David MACÍAS** MSc em Engenharia Civil pela UPV (Espanha), com experiência em análise de risco aplicada a barragens e desastres naturais. Especialista em hidrologia e hidráulica, com participação em projetos internacionais para o BID, incluindo estudos de inundação no Vale do Sula. Atua na estimativa de consequências económicas e sociais.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

COMPARATIVE ANALYSIS OF FMEA AND FAULT TREES AND EVENT TREES APPLIED TO THE INTERNAL EROSION FAILURE MODE

Robert Nagai Gonçalves da CRUZ
Civil Engineer, GWS Engenharia

Ana Caroline ÁGUIDO
Environmental Engineer, GWS Engenharia

Lucas Samuel Santos BRASIL
Civil Engineer, GWS Engenharia

Daniel Claudino Ramos PENNA
Civil Engineer, GWS Engenharia

ABSTRACT

Internal erosion constitutes one of the failure mechanisms potentially applicable to certain geotechnical structures, particularly tailings dams, which may operate under conditions favorable to the development of elevated hydraulic gradients. In this context, the present study performs a comparison between two well-established risk analysis approaches: the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), applied qualitatively, and the combined Fault Tree Analysis (FTA) and Event Tree Analysis (ETA), applied quantitatively, for the assessment of the failure mode associated with internal erosion in a tailings storage facility. The evaluation was developed based on a set of technical assumptions, enabling the comparison between the probability estimated by the quantitative approach through the application of FTA/ETA and the qualitative classification resulting from the FMEA analysis. The comparison encompasses the ranking of causes, the effectiveness of the associated controls, and the potential change in the risk class within the risk matrix as a function of the estimated probabilities. This paper seeks to identify the degree of convergence between the methodologies, as well as the differences arising from their analytical structures, contributing to the discussion on the applicability and limitations of each method in geotechnical risk assessment.

RESUMO

A erosão interna constitui um dos mecanismos de falha potencialmente aplicáveis a determinadas estruturas geotécnicas, em especial barragens de rejeitos que podem operar sob condições favoráveis ao desenvolvimento de gradientes hidráulicos elevados. Neste contexto, o presente trabalho realiza uma comparação entre duas abordagens consolidadas de análise de riscos: a metodologia FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), aplicada de forma qualitativa, e a análise combinada por Árvore de Falhas (FTA - Fault Tree Analysis) e Árvore de Eventos (ETA - Event Tree

Analysis), empregada com caráter quantitativo, para a avaliação do modo de falha associado à erosão interna em uma barragem de disposição de rejeitos. A avaliação foi desenvolvida a partir de um conjunto de premissas técnicas, permitindo a comparação entre a probabilidade estimada pela abordagem quantitativa, por meio da aplicação da FTA/ETA, e a classificação qualitativa resultante da análise FMEA. A comparação abrange a hierarquização das causas, a efetividade dos controles associados e a eventual alteração da classe do risco na matriz de riscos em função das probabilidades estimadas. Este artigo busca identificar o grau de convergência entre as metodologias, bem como as diferenças decorrentes de suas estruturas analíticas, contribuindo para a discussão sobre aplicabilidade e limitações de cada método na avaliação de riscos geotécnicos.

1. INTRODUCTION

Risk management is an important tool in the context of geotechnical engineering and is based on systematic approaches for the identification, assessment, and treatment of risks. This process must be conducted on a continuous basis, involving stages of analysis, monitoring, and reassessment, as well as the communication of risks among stakeholders, thereby supporting decision-making throughout the life cycle of the structure.

In the context of mining, the application of risk analysis methodologies is widely recommended by international standards and guidelines, such as the Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM) [1], as well as by national regulations. In this process, the objective is not only to identify potential failure modes, but also to understand their causes, probabilities of occurrence, and potential consequences, thereby supporting the definition and prioritization of control measures.

Among the failure mechanisms relevant to tailings dams, internal erosion is a phenomenon associated with water flow within the embankment or foundation, capable of promoting the progressive transport of particles and compromising the integrity of the structure. This phenomenon occurs when hydraulic forces exceed the strength of the material, leading to particle mobilization and an increase in the permeability of the embankment [2]. The assessment of this failure mode requires the consideration of multiple factors, including hydraulic conditions, material properties, and the performance of existing drainage systems.

Among the mechanisms associated with internal erosion, backward erosion with pipe formation, or piping, is particularly noteworthy. In this process, a preferential flow path develops in a direction opposite to the flow, potentially leading to structural failure with breach formation [3].

The risk assessment associated with this mechanism requires the use of methodologies capable of representing both the identification of the failure mode and the estimation of its probability of occurrence. Among the available approaches, qualitative methodologies such as Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), and quantitative approaches such as Fault Tree Analysis (FTA) and Event Tree Analysis (ETA), stand out, as they allow the evaluation of failure mechanisms and the estimation of their probabilities of occurrence [4].

Although these methodologies are based on distinct principles, both are widely used in practice for geotechnical risk assessment and may, in some cases, lead to different interpretations regarding the criticality of a given risk associated with a failure mode. In this context, it becomes relevant to understand the degree of convergence between the results obtained from different approaches, as well as their limitations and applicability.

In this context, the objective of the present study is to perform a comparative analysis between the FMEA methodology and the combined approach using Fault Tree and Event Tree Analysis (FTA/ETA), applied to the internal erosion failure mode resulting from backward erosion with pipe formation (piping) in a geotechnical structure within a mining context.

2. METHODOLOGY

The analysis presented in this study is based on the application of two risk assessment methodologies: the FMEA approach and the combined Fault Tree Analysis (FTA) and Event Tree Analysis (ETA) framework. Both were applied to the risk of backward erosion with pipe formation, or piping, in a geotechnical structure within a mining context.

The analyses were conducted through technical workshops involving multidisciplinary teams, allowing the incorporation of different perspectives in the risk assessment, particularly within the FMEA analysis, which is predominantly qualitative in nature.

Figure 1 presents the workflow adopted in this study, which includes the definition of the failure scenario, the characterization of the failure mode, and the application of both qualitative (FMEA) and quantitative (FTA/ETA) approaches, followed by the comparison of the results.

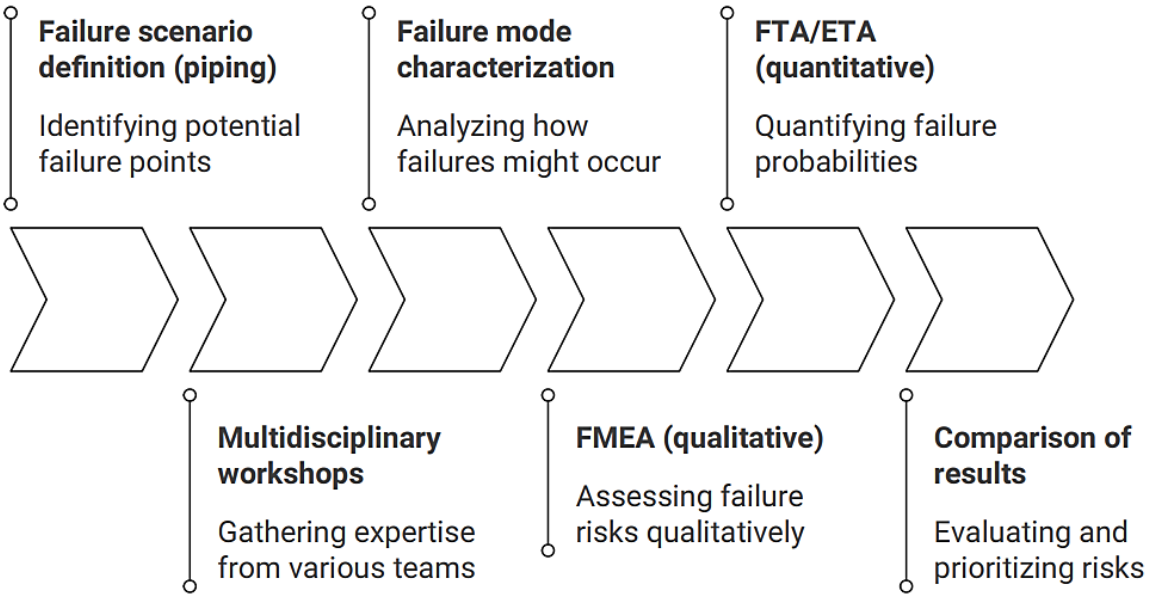


Figure 1 – Workflow of the risk assessment methodology adopted.

2.1. FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)

The FMEA methodology is a systematic tool used to identify and analyze the potential failure modes of a system, as well as their associated effects and causes. It is a predominantly qualitative approach, based on the assessment of the criticality of failure modes through the combination of criteria such as probability of occurrence, severity of consequences, and detectability [5].

FMEA is widely used in risk assessment for dams, allowing the systematic structuring of failure modes, causes, effects, existing controls, and associated consequences. Its application enables the analysis process to be organized in different levels, from local effects to final consequences. In addition, it allows for the assessment of the

effectiveness of existing controls, including preventive, detection, and mitigative controls, as well as the identification of potential gaps in monitoring systems.

In general, the methodology is developed based on the following steps:

- Compilation of available information regarding the structure and its operational history;
- Identification of potential failure modes and their causes;
- Evaluation of the effects associated with each failure mode;
- Analysis of the detectability provided by existing controls;
- Assignment of a risk classification based on the combination of probability and severity.

Risk classification is typically performed using risk matrices, which allow scenarios to be categorized into levels, supporting the decision-making process in risk management.

For the FMEA analysis, the probability rating was supported by qualitative classes associated with indicative annual frequency ranges. These classes were used as a reference for structured engineering judgment, considering the available technical information, the operating condition of the structure, and the effectiveness of existing controls. The probability classification criteria adopted in the FMEA analysis are presented in Table 1.

Table 1 - Probability classification criteria adopted for the FMEA analysis.

Classification	Rating	Description
Almost impossible	1	The undesired outcome will almost certainly not happen, but may occur under rare or exceptional circumstances. Indicative annual frequency: once every 100,000 years (10^{-5})
Very unlikely	2	The undesired outcome is unlikely to occur, but it may happen unexpectedly. Indicative annual frequency: once every 10,000 years (10^{-4})
Unlikely, but possible	3	It is possible that the undesired outcome may occur. Indicative annual frequency: once every 1,000 years (10^{-3})
Likely	4	The undesired outcome is likely to occur. Indicative annual frequency: once every 100 years (10^{-2})
Very likely	5	The undesired outcome is very likely to occur. Indicative annual frequency: once every 10 years (10^{-1})
Almost certain	6	The undesired outcome is almost certain to occur. Indicative annual frequency: once per year (10^{0})

2.2. Fault Trees and Event Trees

Fault Tree Analysis (FTA) is a deductive technique that enables the identification of combinations of events that may result in an undesired top event, and it is widely used in dam safety analyses for understanding failure mechanisms [6]. The tree is constructed by decomposing the main event into intermediate events and basic events, interconnected through logical gates, such as “AND” and “OR”. These relationships

allow the dependency between events to be modeled and, when associated with probabilities, enable the quantitative estimation of the occurrence of the top event.

In turn, Event Tree Analysis (ETA) is an inductive approach that starts from an initiating event and evaluates the possible sequences of subsequent events, considering the success or failure of control and mitigation systems. Based on this structure, different possible scenarios are defined, each associated with a probability of occurrence, allowing for consequence analysis and risk quantification.

The combined FTA/ETA analysis is based on the integration of inductive and deductive approaches for risk assessment. The Event Tree constitutes the main structure of the analysis, representing the progression of the failure process through a sequence of conditional stages, from initiation to the occurrence of the final event. In turn, the Fault Tree is used as a complementary tool for the identification and structuring of the causes associated with specific events throughout the analysis, enabling the understanding of the factors that influence the occurrence of each stage of the process. Figure 2 presents a schematic model of the logical sequence of an event tree, Figure 3 presents a schematic model of a fault tree.

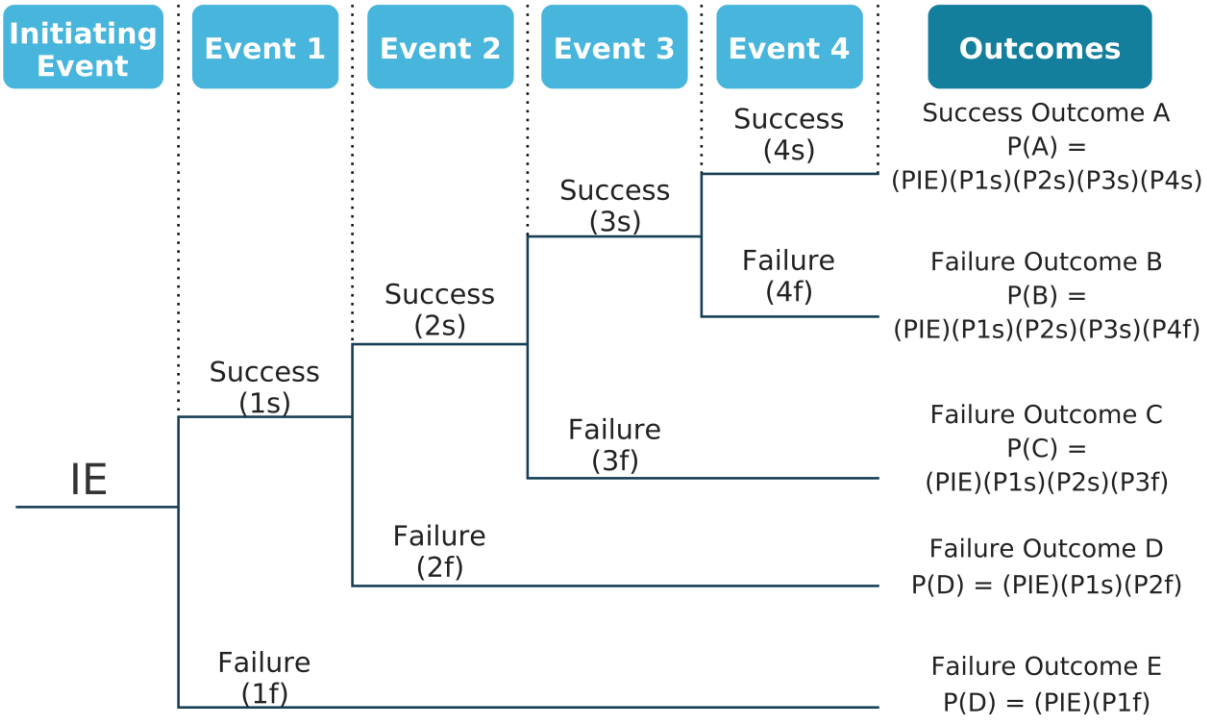


Figure 2 – Schematic Model of the Event Tree Methodology.

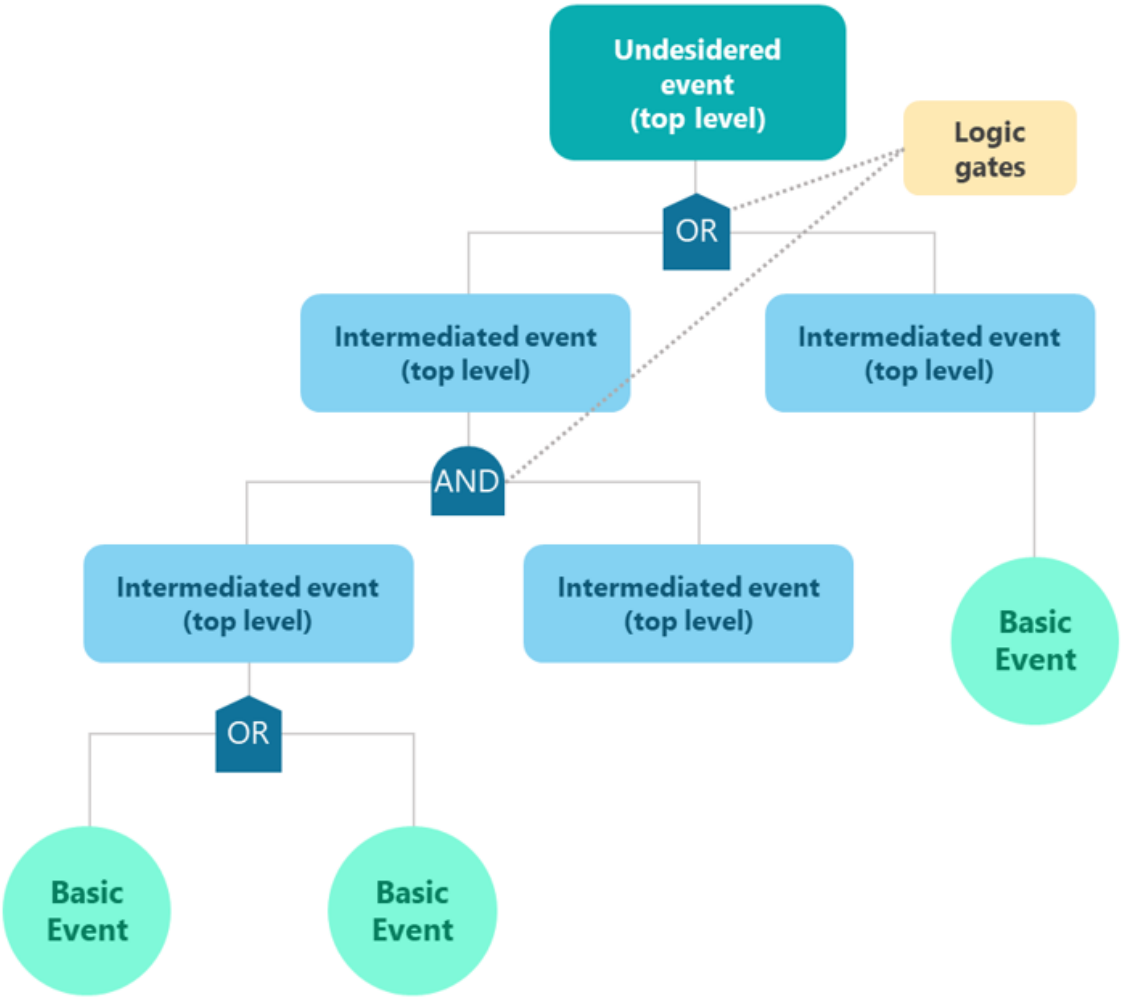


Figure 3 – Schematic Model of the Fault Tree Methodology.

Within this context, for both methodologies, probability is calculated using Boolean algebra formulas. Equation (1) is used for the logical operator “AND”, and Equation (2) is used for the logical operator “OR”.

$$P = P_1 \times P_2 \times \ldots \times P_n \quad (1)$$

$$P = 1 - [(1 - P_1) \times (1 - P_2) \times \ldots \times (1 - P_n)] \quad (2)$$

In the application of FTA, probability values may be defined with the aid of verbal descriptors, as shown in Table 2.

Table 2 - Probability Equivalents for Verbal Descriptors. Source: Adapted from Vick (1997), Lichtenstein & Newman (1967) apud Baecher & Christian (2003) [7].

Verbal Descriptor	Equivalent Likelihood
Virtually impossible	0.01
Unlikely	0.15
Neutral (There is no information regarding the likelihood of the event occurring, or the chances of occurrence are considered equal)	0.50
Fairly likely	0.70
More likely	0.85
Virtually certain	0.99

The event tree associated with the internal erosion failure mode is presented in Figure 4, based on the generic sequence of events proposed by the US Bureau of Reclamation [8]. The structure represents the evolution of the process through successive conditional stages, from the initial hydraulic conditions to the occurrence of structural failure.

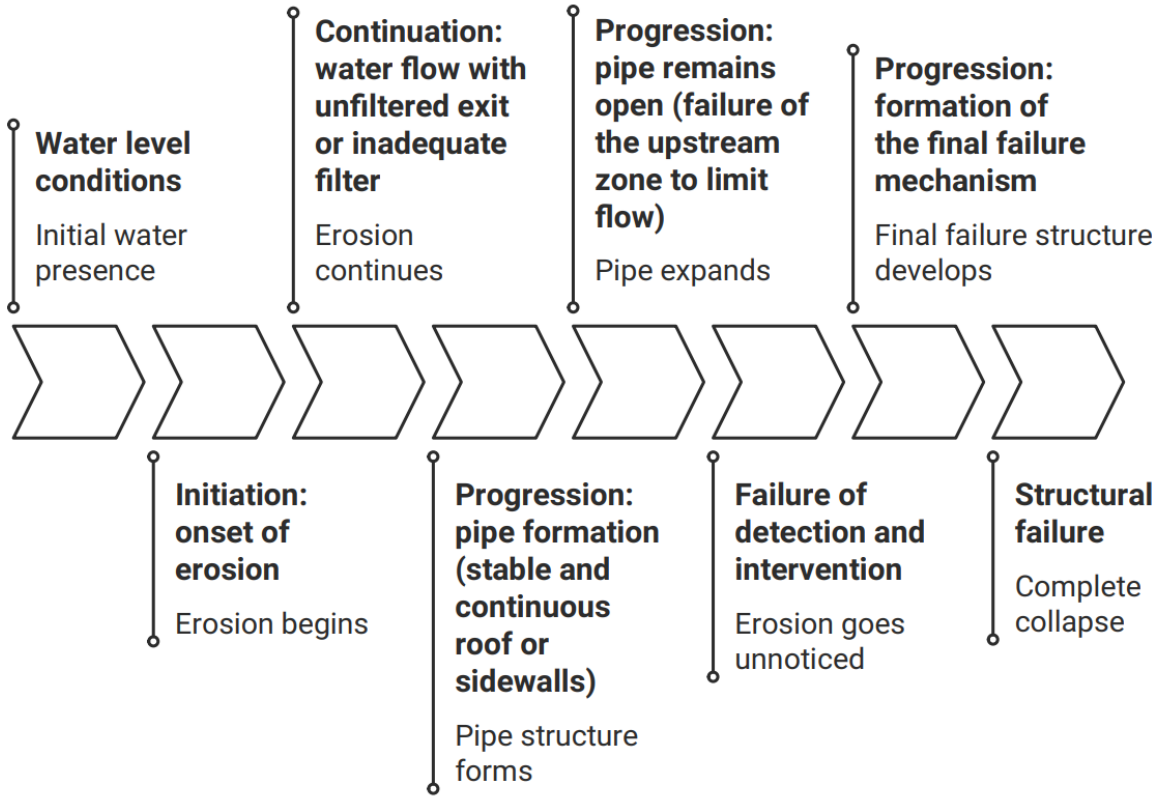


Figure 4 – Event tree structure for internal erosion. Source: adapted from US Bureau of Reclamation (2012)

The structuring of the Fault Trees and Event Trees, as well as the definition of the probabilities associated with the internal erosion event involving backward erosion by pipe formation, or piping, were based on approaches well established in the technical literature, with particular emphasis on the studies developed by Fell and co-authors [9–12].

These authors proposed systematic methodologies for the probabilistic analysis of internal erosion in dams, considering different development mechanisms, including erosion along cracks, erosion associated with buried conduits, and backward erosion by piping. Such approaches provide the basis for assigning probabilities to the basic events in the Fault Trees, thereby supporting the definition of conditional probabilities in the Event Tree.

As an example, Figure 5 presents one of the nodes associated with the progression stage of internal erosion, corresponding to pipe formation. In this case, the probability of pipe formation is evaluated based on the ability of the material to support the roof of the pipe, considering two conditioning factors: fines content and degree of saturation. These factors are connected by an “AND” logical gate, indicating that the combined occurrence of both conditions is considered in the probability assessment. Therefore, under the adopted assumptions, the probability associated with this node is obtained by multiplying the likelihood values assigned to each contributing factor.

Table 3 summarizes the main influencing factors considered in this assessment, highlighting the role of fines content and degree of saturation, which directly affect the ability of the material to sustain the pipe roof, according to criteria adapted from the literature.

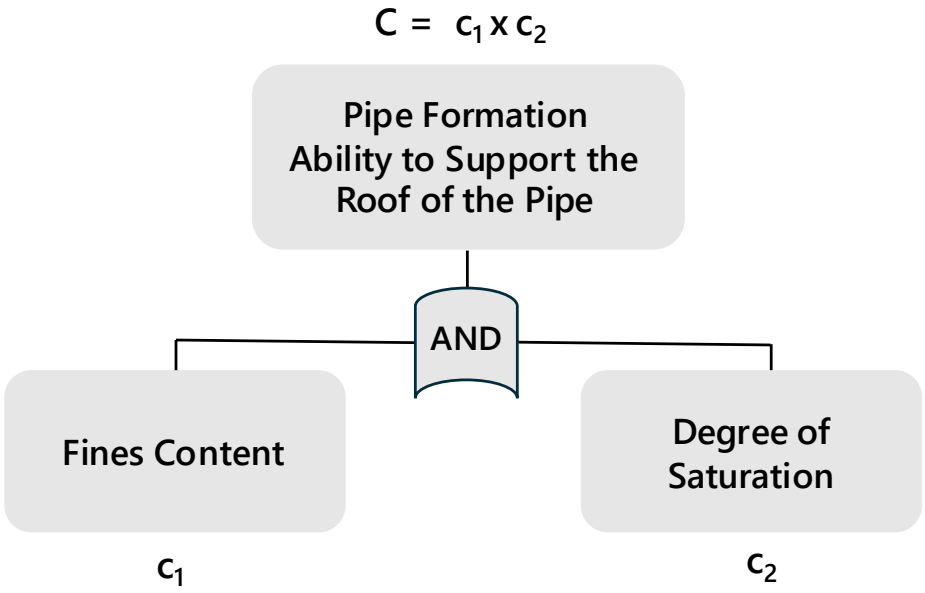


Figure 5 – Progression: Pipe Formation. Source: adapted from Fell et al. (2005) [9].

Table 3 - Influencing Factors on the Probability of Pipe Formation – Ability to Support the Pipe Roof. Source: adapted from Fell et al. (2005) [9].

Influencing factor	More likely	Neutral	Unlikely
Fines content (% smaller than 0.075 mm)	Fines content > 15%	Fines content < 15% and > 5%	No fines or fines content < 5%
Degree of saturation	Partially saturated (first filling)	-	Saturated

3. RESULTS

The FMEA, ETA, and FTA methodologies were applied to the analysis of the internal erosion failure mode associated with the mechanism of backward erosion with pipe formation, or piping, in a geotechnical structure within a mining context. The results obtained from both methodologies are presented below, allowing a comparison between the qualitative and quantitative approaches. Due to confidentiality constraints, specific characteristics of the analyzed structure are not disclosed, and only the aspects necessary for understanding the application of the methodologies are presented.

3.1. FMEA Analysis Results

In the application of the FMEA methodology, the failure mode associated with internal erosion was evaluated by considering the segmentation of its development into three evolutionary stages, from process initiation to the occurrence of final consequences (first stage, second stage, and third stage). This approach makes it possible to associate each stage in the development of the failure mode with the available detection mechanisms, represented by the existing controls, thereby enabling an assessment of the stage at which the event may be identified, rather than necessarily being limited to the final stage of failure.

For the case analyzed, considering the existing controls and based on the consensus of the technical team involved, it was established that the failure mode can be identified at an early stage of development. This stage is associated with detectable indications through geotechnical instrumentation, such as changes in pore pressures, as well as the possible formation of concentrated flows in regions with greater susceptibility to erosion.

Figure 6 presents a synthesis of the results obtained in the FMEA analysis, including the description of the evaluated failure mode, its associated causes, the expected effects, and the corresponding probability rating.

Based on this stage definition and the assessment of the existing controls, a probability of occurrence on the order of 10^{-4} was assigned, which, according to the probability classification criteria presented in Table 1, corresponds to an event classified as very unlikely.

FAILURE MODE	FAILURE MODE CAUSES	FAILURE MODE EFFECTS			LIKELIHOOD
		Local Impacts (First Stage)	Intermediate Impacts (Second Stage)	Final Impacts (Final Stage)	
INTERNAL EROSION	**High hydraulic gradient**	Changes in pore pressure; Formation of concentrated flow in the vulnerable region	Occurrence of seepage with transport of solids, which may progress to piping formation	Breach formation with downstream release of stored material, potentially affecting groundwater and watercourses	10^{-4}

Figure 6 – Results of the FMEA risk analysis.

3.2. Fault Tree and Event Tree Analysis Results

Figure 7 presents the Event Tree Analysis (ETA) developed for the top event considered in the analysis, corresponding to the undesired scenario of structural failure, with breach formation and the consequent release of the stored material.

The ETA was structured into successive stages, representing the evolution of the internal erosion process from its initiation to the occurrence of final failure. The process is described through conditional stages, including erosion initiation, continuation of the erosive process, progression with pipe formation and maintenance, capacity for detection and intervention, and, finally, evolution toward the formation of the final failure mechanism.

At each stage, the conditions required for the progression of the phenomenon are evaluated, as well as the factors that may interfere with its evolution, including those that may favor its progression, limit its development, or interrupt the erosive process.

The probability of occurrence of the top event was estimated through the integrated application of ETA and FTA, resulting in an order of magnitude of 10^{-7}, obtained from the combination of the conditional probabilities associated with the different stages of the process.

The probabilities presented in the Event Tree were obtained from the Fault Trees associated with each Event Tree node. For the basic events in the Fault Trees, likelihood values were assigned using the verbal descriptor scale presented in Table 2. Due to confidentiality restrictions, the detailed Fault Trees associated with the nodes of the Event Tree are not presented.

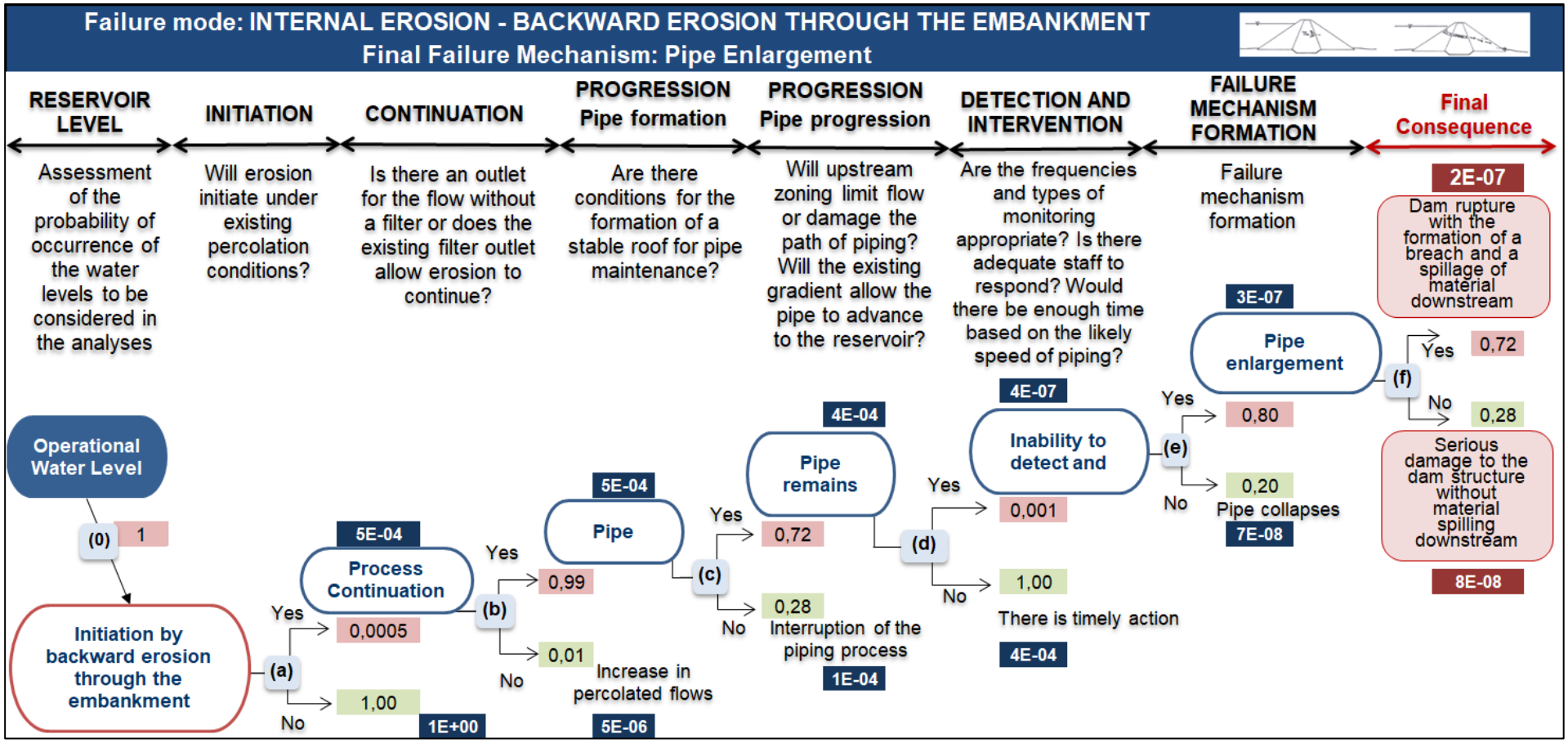


Figure 7 – Event Tree for Internal Erosion.

4. DISCUSSION

The comparison between the results obtained through the FMEA analysis and the combined FTA/ETA approach highlights relevant differences associated with the ways in which risk is represented and quantified.

The FMEA methodology, which is predominantly qualitative in nature, is strongly influenced by the experience of the technical team involved and by the quality of the available information. In this context, the assignment of probabilities is associated with structured engineering judgment, taking into account operating conditions, existing controls, and the ability to detect the event throughout its evolutionary stages. For the scenario analyzed, a probability of occurrence on the order of 10^{-4} was obtained.

In contrast, the approach based on Fault Trees and Event Trees, applied in a quantitative manner, allows probability to be estimated from the logical modeling of causes and the assignment of numerical values to events. This structure provides a more objective basis for risk assessment, resulting in this study in a probability on the order of 10^{-7} for the failure scenario considered.

It should be noted that, in both approaches, the existing controls were taken into account, thus characterizing residual risk analyses. Therefore, the difference observed between the results is not associated with the consideration of control measures, but rather with the distinct analytical structures and, above all, with the end point adopted in each methodology.

In the case of FMEA, the assessment was conducted with a focus on identifying the failure mode at an early stage of development, associated with signs that could be detected by means of instrumentation and monitoring systems. In contrast, in the FTA/ETA approach, the event analyzed corresponds to the final stage in the development of the mechanism, associated with structural failure with breach formation.

This distinction directly affects the order of magnitude of the estimated probabilities, since events associated with early stages tend to present a higher probability of occurrence when compared with the final failure scenario, which represents an event of greater severity and lower frequency.

Additionally, it is observed that the FMEA methodology provides broader coverage in the assessment of different failure modes, making it suitable for obtaining an overall view of the risks associated with the structure. On the other hand, the FTA/ETA approach allows a more in-depth analysis of specific mechanisms, providing greater detail in probability quantification and contributing more directly to the prioritization of mitigation measures.

Thus, these methodologies should not be interpreted as mutually exclusive, but rather as complementary, and may be applied in an integrated manner in the geotechnical risk assessment process.

5. CONCLUSIONS

The analyses carried out enabled a comprehensive assessment of the risk scenario associated with the structure, encompassing approaches with different levels of detail and purposes. Initially, the analysis was conducted in a multidisciplinary and predominantly qualitative manner through the application of the FMEA methodology, allowing the identification of the failure mode, the mechanisms involved, and the associated consequences, resulting in a probability of occurrence on the order of 10^{-4}.

Subsequently, the application of the FTA (Fault Tree Analysis) and ETA (Event Tree Analysis) methodologies enabled progression to a quantitative approach, making it possible to estimate the probability of the analyzed scenario, for which a probability on the order of 10^{-7} was obtained. The results highlighted differences in the order of magnitude of the probabilities obtained, associated with the characteristics of the mechanism evaluated, the assumptions adopted, and, above all, the definition of the end point considered in each approach.

It is observed that, although the methodologies have different natures, their application proves to be complementary in the context of geotechnical risk assessment. While FMEA allows a structured assessment of the failure mode, the FTA/ETA approach enables greater refinement in probability quantification and a better understanding of the contribution of individual events to the overall risk.

Additionally, it should be noted that comparative analyses conducted under the same end point and set of assumptions may provide more direct interpretations of the observed differences. Even so, the set of analyses performed made it possible to consistently represent the behavior of the phenomenon under evaluation.

Finally, it is emphasized that the application of these methodologies depends directly on the proper definition of the analysis scenario, the quality of the available information, and the technical experience of the team involved. In this context, the selection of the most appropriate approach should consider the characteristics of the failure mechanism, the level of detail required, and the specific objectives of the study.

6. KEYWORDS

Risk Analysis, FMEA, Fault Tree Analysis, Event Tree Analysis, Internal Erosion.

7. REFERENCES

[1] ICMM; UNEP; PRI (2020) – “Global Industry Standard on Tailings Management”. International Council on Mining and Metals, United Nations Environment Programme, Principles for Responsible Investment.

[2] FELL, R.; FOSTER, M.; WAN, C. (2004) – “The mechanics of internal erosion of embankment dams”. Proceedings of the 2nd International Conference on Dam Safety, USA.

[3] ICOLD (2013) – “Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations”. Bulletin 164, Paris.

[4] MELO, A. V. (2014) – “Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: Estudo de caso de barragens da Cemig GT”. 166 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – UFMG, Belo Horizonte.

[5] STAMATIS, D. H. (2003) – “Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution”. ASQ Quality Press, USA.

[6] FUSARO, T. C.; PAGLIOTO, L. G.; SOUZA, N. P. (2019) – “O emprego da análise por árvore de falhas no entendimento do modo de falha galgamento de barragens”. XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Salvador, Brasil.

[7] BAECHER, G. B.; CHRISTIAN, J. T. (2003) – “Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering”. John Wiley & Sons, West Sussex, England.

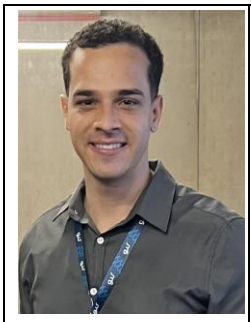
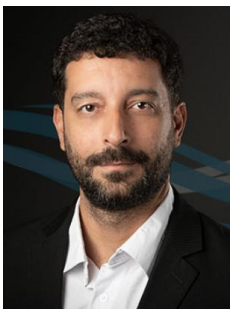
[8] US BUREAU OF RECLAMATION (2012) – “Internal Erosion (Piping) Risk Analysis”. Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis, Chapter D-6, Denver, USA.

[9] FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. (2005) – “Geotechnical Engineering of Dams”. Taylor & Francis, London, UK.

[10] FELL, R.; FOSTER, M.; CYGANIEWICZ, J.; SILLS, G.; VROMAN, N.; DAVIDSON, R. (2009) – “Risk Analysis for Dam Safety – A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping”. UNICIV Report No. 446, University of New South Wales, Sydney, Australia.

[11] FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G.; FOSTER, M. (2015) – “Geotechnical Engineering of Dams – 2nd Edition”. Taylor & Francis, London, UK.

[12] FELL, R.; FRY, J. J. (eds.) (2007) – “Internal Erosion of Dams and Their Foundations”. Taylor & Francis, London, UK.

	**Robert Nagai Gonçalves da CRUZ** Civil Engineer (UFMG, 2022) and M.Sc. candidate in Geotechnics at UFSC. Since 2023, he has been working at GWS Engenharia, with experience in applied geotechnics, risk analysis using different methodologies, preparation of PGRBM, and safety assessment of geotechnical structures.
	**Ana Caroline ÁGUIDO** Environmental Engineer (UFMG, 2016) and M.Sc. in Sanitation, Environment, and Water Resources (UFMG, 2022). Senior Engineer at GWS Engenharia, working in the areas of Hydrology, Hydraulics, Dam Safety, Hypothetical Dam Breach Studies, Risk Analyses using different methodologies, geotechnical governance, and GISTM compliance.
	**Lucas Samuel Santos BRASIL** Civil Engineer (UFMG, 2002) and M.Sc. in Sanitation, Environment, and Water Resources (UFMG, 2005). Managing Partner at GWS Engenharia and Professor at PUC Minas. With previous experience at CEMIG, Pimenta de Ávila, and Vale, he has expertise in Hydrology, Hydraulics, Dam Safety, and Hypothetical Dam Breach Studies. He has published technical papers in Brazil and abroad and is a member of CBDB and ASDSO.
	**Daniel Claudino Ramos PENNA** Civil Engineer (UFOP, 2004) and M.Sc. in Geotechnical Engineering (UFOP, 2007). Managing Partner at GWS Engenharia. He works in activities such as Geotechnical Risk Management, follow-up of Dam Safety Plan reviews, preparation of Operation Manuals, audits, participation in expert panels, and master planning for tailings disposal.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4 MODOS DE FALHA E ANÁLISE DE RISCOS DE ESTRUTURAS
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

GESTÃO DE RISCOS EM PILHAS DE REJEITO SUSCETÍVEIS À LIQUEFAÇÃO: INTEGRAÇÃO DE FMEA, CONTROLES CRÍTICOS E A ISO 31000

Luisa de Moura LEÃO
Engenheira Civil Geotécnica, DSc. em Geotecnia
3EM Mineração e Geologia

Marta Sawaya MIRANDA
Engenheira Geóloga, MSc. em Engenharia de Barragens
3EM Mineração e Geologia

Lúcio Miranda CAMÊLO
Engenheiro de Minas, Esp. em Geotecnia e Engenharia de Barragens
3EM Mineração e Geologia

Marconi Bicalho CESCO
Engenheiro de Minas, Esp. em Engenharia Geotécnica
3EM Mineração e Geologia

Letícia Thomaz de Souza VIEIRA
Graduanda em Engenharia de Minas
Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

Pilhas de rejeito suscetíveis à liquefação apresentam mecanismos de falha e potenciais de impacto comparáveis aos de barragens de rejeitos, porém permanecem, em grande parte, fora de exigências regulatórias específicas quanto à implementação formal de Processos de Gestão de Riscos (PGR). Este artigo propõe e aplica um método estruturado de gestão de riscos especificamente adaptado a pilhas de rejeito, fundamentado na integração da ABNT NBR ISO 31000, da Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) ajustada ao contexto geotécnico e do conceito de Controles Críticos do International Council on Mining and Metals (ICMM). A metodologia compreende a decomposição da estrutura em subsistemas técnicos e organizacionais, a padronização de cenários de falha por meio de Eventos Indesejados Principais (MUEs), a avaliação integrada de severidade, probabilidade e detectabilidade, a priorização dos riscos via RPN e seu enquadramento segundo o princípio ALARP. Os resultados demonstram que riscos associados à instabilidade global, à degradação de sistemas de drenagem e à liquefação permanecem predominantemente no domínio crítico, evidenciando a limitação de abordagens prescritivas isoladas. O método proposto mostrou-se tecnicamente consistente, rastreável e aplicável ao longo do ciclo de vida da estrutura, oferecendo um suporte objetivo à tomada de decisão, à definição de

controles críticos e ao fortalecimento da governança e da cultura de segurança em empreendimentos de mineração.

ABSTRACT

Tailings stacks susceptible to liquefaction exhibit failure mechanisms and impact potentials comparable to those of tailings dams; however, they largely remain outside specific regulatory requirements regarding the formal implementation of Risk Management Processes (RMP). This paper proposes and applies a structured risk management methodology specifically adapted to tailings stacks, grounded in the integration of ABNT NBR ISO 31000, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) tailored to the geotechnical context, and the Critical Controls framework of the International Council on Mining and Metals (ICMM). The methodology comprises the decomposition of the structure into technical and organizational subsystems, the standardization of failure scenarios through Major Unwanted Event (MUEs), the integrated assessment of severity, likelihood, and detectability, and the prioritization of risks using the Risk Priority Number (RPN), followed by their classification according to the ALARP principle. The results demonstrate that risks associated with global instability, degradation of drainage systems, and liquefaction predominantly remain within the critical domain, highlighting the limitations of isolated prescriptive approaches. The proposed method proved to be technically robust, traceable, and applicable throughout the entire lifecycle of the structure, providing objective support for decision-making, the definition of critical controls, and the strengthening of governance and safety culture in mining operations.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de riscos em estruturas de mineração no Brasil evoluiu significativamente após acidentes com barragens de rejeitos [1], que evidenciaram fragilidades técnicas e institucionais e impulsionaram o fortalecimento regulatório e da governança. Nesse contexto, os Processos de Gestão de Riscos (PGR) consolidaram-se como instrumentos centrais para a segurança de estruturas críticas, sob abordagem preventiva e integrada [2].

Por outro lado, pilhas de rejeito e estruturas de disposição compartilhada, embora apresentem mecanismos de falha e impactos comparáveis aos de barragens, não estão, em geral, sujeitas a exigências normativas específicas de gestão estruturada de riscos. A literatura aponta que tais estruturas podem apresentar falhas abruptas, incluindo instabilidade, erosão interna e fluxos de massa, com consequências severas [3,4].

Essa lacuna regulatória é particularmente relevante em climas tropicais, onde variabilidade hidrológica, eventos extremos e ciclos de secagem-umedecimento influenciam o comportamento hidrogeotécnico e a suscetibilidade à liquefação, ampliando incertezas de desempenho. Estudos recentes reforçam a necessidade de incorporar explicitamente fatores climáticos e hidráulicos na avaliação de risco dessas estruturas [5,6].

1.1 Contexto Técnico e Regulatório

O estudo baseia-se na Resolução ANM nº 95/2022 [7], especialmente nos Artigos 49 a 53, que estabelecem diretrizes para implementação de PGR em estruturas de mineração. Essa resolução foi substituída pela Resolução ANM nº 220/2025 [8], publicada em outubro de 2025 e com vigência a partir de agosto de 2027, que reorganiza a gestão de segurança de barragens de mineração sob a lógica de gestão integrada de risco e, de forma particularmente relevante para este estudo, submete os empilhamentos drenados suscetíveis à liquefação às obrigações aplicáveis às estruturas de maior criticidade. Complementarmente, a ABNT NBR 13028-3:2025 [9] estabeleceu, pela primeira vez, critérios normativos específicos para pilhas de rejeitos desaguados, incluindo requisitos de estabilidade geotécnica, drenagem e monitoramento e, em seu Anexo A, metodologias de avaliação de liquefação estática e cíclica alinhadas ao GISTM, à ICOLD e à ANCOLD.

O referencial é complementado por normas e diretrizes internacionais, como a ABNT NBR ISO 31000 [10], o *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM) [11], publicações do *International Commission on Large Dams* (ICOLD) [12] e do *International Council on Mining and Metals* (ICMM) [13], além de princípios internacionais de governança [14], assegurando alinhamento às boas práticas globais. Nesse conjunto, a ANCOLD [15] é especialmente relevante por consolidar critérios para caracterização geotécnica, controle de poropressões, drenagem, instrumentação, monitoramento e resposta operacional ao risco ao longo do ciclo de vida de estruturas de rejeitos.

1.2 Justificativa, Objetivo e Inovação Operacional

A inovação do trabalho consiste na adaptação integrada de ferramentas consolidadas de gestão de riscos ao contexto de pilhas de rejeito, com ênfase na liquefação como mecanismo progressivo e no papel da saturação, da poropressão, da resposta não drenada e das condições de drenagem na definição da criticidade [16]. O modelo articula engenharia geotécnica, gestão de riscos estruturada e governança, alinhado às exigências da Resolução ANM nº 220/2025 [8] e da ABNT NBR 13028-3:2025 [9], independentemente de exigência normativa prévia.

A proposta trata pilhas de rejeito como sistemas geotécnicos complexos ao longo do ciclo de vida, superando abordagens simplificadas. O aumento na frequência e severidade de falhas reforça a necessidade de modelos estruturados de suporte à decisão [17].

Assim, o estudo propõe e exemplifica um PGR adaptado às condições geotécnicas e ambientais dessas estruturas, integrando a ISO 31000, a FMEA aplicada à geotecnia, o princípio ALARP e o conceito de Controles Críticos do ICMM [18], com ganhos em segurança, governança e rastreabilidade.

2. ESTRUTURAÇÃO DO PROCESSO DE GESTÃO DE RISCO

O Processo de Gestão de Riscos (PGR) foi estruturado com base na ABNT NBR ISO 31000 [10] (Figura 1), compreendendo as etapas de estabelecimento do contexto, identificação, análise, avaliação e tratamento dos riscos, além de comunicação e monitoramento contínuos.

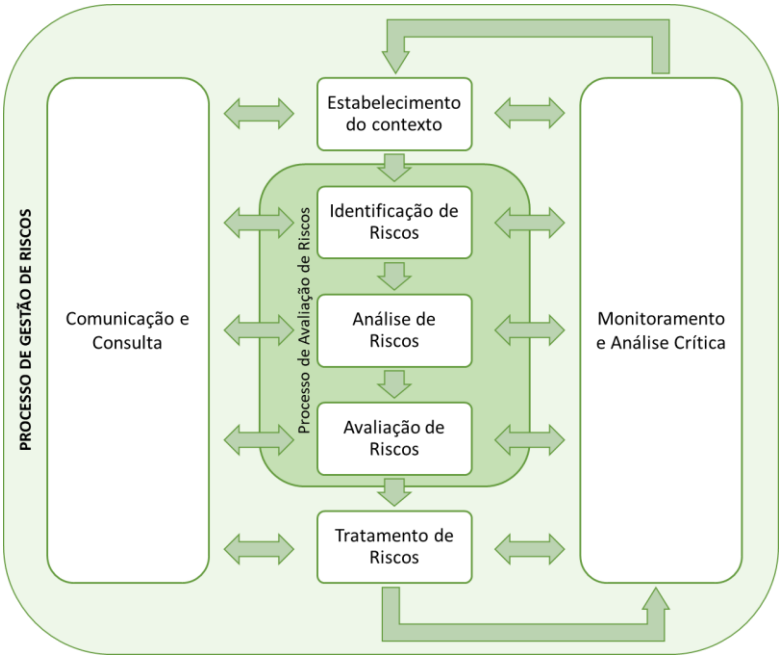


Figura 1 – Fluxograma do Processo de Gestão de Risco (Adaptado de [10])

No estabelecimento do contexto, são definidos os limites do sistema e as variáveis relevantes, com decomposição da estrutura em subsistemas técnicos e organizacionais, base para a identificação sistemática dos riscos.

A identificação é conduzida por meio de um framework baseado em Análise de Modos e Efeitos de Falha (*Failure Mode and Effects Analysis – FMEA*), estruturando, por subsistema, os modos de falha, causas e efeitos. Os cenários são organizados a partir de Evento Indesejado Principal (*Major Unwanted Event – MUE*), permitindo a consolidação de consequências equivalentes e maior consistência analítica.

A análise de riscos segue a abordagem FMEA adaptada à geotecnia de mineração de Robertson e Shaw (2004) [19], integrando severidade, probabilidade e detectabilidade. Essa análise é complementada por matrizes temáticas de impacto: (i) meio biótico e uso do solo, (ii) regulatório, (iii) imagem e percepção pública e (iv) saúde e segurança, assegurando rastreabilidade entre causas, mecanismos e consequências.

A avaliação resulta no Número de Prioridade de Risco (*Risk Priority Number – RPN*), interpretado segundo o princípio “Tão Baixo Quanto Razoavelmente Praticável” (*As Low As Reasonably Practicable – ALARP*), permitindo classificar os riscos em aceitáveis, toleráveis ou inaceitáveis, considerando também a confiabilidade dos controles e a capacidade de detecção.

O tratamento dos riscos é orientado pela definição de Controles Críticos, conforme diretrizes do International Council on Mining and Metals, com foco na prevenção e mitigação de MUEs por meio de requisitos de desempenho e gatilhos de ação.

De forma transversal, o monitoramento e a comunicação asseguram a verificação contínua da efetividade dos controles e a atualização do modelo de risco ao longo do tempo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Contextualização da Estrutura: Subsistemas

A contextualização da estrutura compreende a definição do contexto interno e externo da pilha de rejeito. O contexto interno inclui características geométricas, geotécnicas e hidrogeológicas, histórico construtivo e operacional, instrumentação e práticas de gestão. O contexto externo abrange condições climáticas, uso do entorno, sensibilidade ambiental e requisitos regulatórios.

A partir desse enquadramento, a estrutura é decomposta em subsistemas técnicos e organizacionais, gestão e governança, maciço, fundação, drenagem interna e superficial, monitoramento e estruturas de contenção, constituindo a base para a identificação sistemática dos riscos.

Essa segmentação permite uma análise estruturada e rastreável, reduzindo omissões e organizando, para cada subsistema, os modos de falha, causas, mecanismos, MUEs e consequências, em alinhamento com a ABNT NBR ISO 31000.

3.2 Identificação dos Riscos: FMEA

A identificação dos riscos foi conduzida por meio de um framework baseado em FMEA, estruturando, para cada subsistema, os modos de falha, suas causas, efeitos e respectivos Eventos Indesejados Principais (MUEs). A abordagem foi empregada como ferramenta de sistematização, assegurando rastreabilidade entre causas, mecanismos e consequências [20–22].

A padronização por MUEs permitiu agrupar cenários com consequências equivalentes, reduzindo redundâncias e aumentando a consistência da análise [23]. As Tabelas 1 a 7 consolidam os resultados, com identificação de 8 MUEs associados aos subsistemas avaliados, evidenciando o caráter sistêmico dos riscos.

Tabela 1 – Subsistema A: Gestão e Governança

ID	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	Evento Indesejado (MUE)
A1	Falha de gestão e de governança técnica	Documentação técnica insuficiente, ausência de estudos preliminares e baixa aderência entre projeto e execução	Desempenho incompatível com o projeto, paralisações operacionais e sanções regulatórias	Falha sistêmica com potencial de danos ambientais, socioeconômicos e legais
A2	Falha na estrutura hierárquica e tomada de decisão, operação e manutenção	Cadeia hierárquica fragmentada, indefinição de responsabilidades e decisões sem suporte técnico adequado	Resposta tardia a condições críticas, aceitação de desvios de projeto e agravamento progressivo da instabilidade	Falha sistêmica com potencial de danos ambientais, socioeconômicos e legais

Tabela 2 – Subsistema B: Maciço da Pilha

	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
B1	Instabilidade de taludes (rotação, translação, colapso)	Geometria desfavorável, taludes íngremes, ausência de bermas e erosão não controlada	Abertura de trincas, perda de confinamento e instabilidade localizada	Ruptura local devido à instabilidade geotécnica
B2	Sobrecarga estrutural por tensões verticais excessivas	Alteamento rápido e altura excessiva sem dissipação de poropressões	Redução da segurança global e aumento da suscetibilidade à ruptura profunda	Ruptura global devido à instabilidade geotécnica
B3	Maciço heterogêneo com camadas fracas	Variabilidade do rejeito, baixa compactação e segregação granulométrica	Redução da resistência, anisotropia e recalques diferenciais	Ruptura local devido à instabilidade geotécnica

	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
B4	Erosão interna no maciço por gradientes hidráulicos elevados	Elevação do nível piezométrico e fluxos concentrados em interfaces frágeis	Perda progressiva de material e degradação estrutural	Ruptura global devido à instabilidade geotécnica
B5	Instabilidade do maciço por saturação de taludes	Elevação do grau de saturação por falhas de drenagem e eventos pluviométricos intensos	Redução da resistência ao cisalhamento e mobilização de escorregamentos	Ruptura global devido à instabilidade geotécnica
B6	Trincamento e retração do maciço	Secas prolongadas e perda de sucção em solos não saturados	Formação de trincas e aumento da infiltração subsequente	Ruptura local devido à instabilidade geotécnica
B7	Erosão superficial e escorregamento raso	Chuvas intensas, falha de revegetação e drenagem superficial ineficiente	Remoção de material e degradação geométrica dos taludes	Erosão ou escorregamento superficial
B8	Liquefação estática	Aumento de poropressão sob carregamento monotônico em material saturado	Perda abrupta de resistência e grandes deformações	Ruptura por liquefação
B9	Liquefação cíclica	Acúmulo de poropressão por carregamentos repetidos (tráfego, vibrações, sismos induzidos)	Redução gradual da rigidez e da resistência ao cisalhamento	Ruptura por liquefação

Tabela 3 – Subsistema C: Fundação da Pilha

	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
C1	Reativação de descontinuidades geológicas	Falhas, fraturas, contatos inclinados e zonas de cisalhamento não mapeadas	Redução da resistência ao cisalhamento e desenvolvimento de deslizamento basal	Ruptura global devido à instabilidade geotécnica
C2	Ruptura não drenada da fundação	Solos moles ou saturáveis associados à infiltração e carregamento do maciço	Perda de capacidade de suporte e ruptura basal com extrusão de material	Ruptura global devido à instabilidade geotécnica

C3	Erosão interna na fundação por gradientes hidráulicos elevados	Gradientes hidráulicos elevados e ausência de filtros adequados	Perda progressiva de material e aumento de deformações	Ruptura global devido à instabilidade geotécnica
C4	Liquefação da fundação	Materiais granulares saturados sob nível freático elevado e carregamento	Perda súbita de resistência e recalques abruptos	Ruptura por liquefação

Tabela 4 – Subsistema D (Drenagem Interna)

ID	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
D1	Deformação do sistema de drenagem interna	Recalques diferenciais, fluência do rejeito, sobrecarga e baixa rigidez dos drenos	Redução da capacidade hidráulica, desvio de fluxos e aumento localizado de poropressões	Ruptura por instabilidade hidráulica
D2	Ineficiência funcional do sistema de drenagem interna	Execução inadequada, materiais impróprios e ausência de manutenção	Elevação do nível freático, aumento de poropressões e perda de controle hidráulico	Ruptura por instabilidade hidráulica

Tabela 5 – Subsistema E: Drenagem Superficial

ID	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
E1	Falha na proteção de taludes	Ausência ou deficiência de proteção superficial associada a drenagem inadequada e eventos pluviométricos intensos	Erosão superficial, carreamento de material e degradação dos taludes	Erosão superficial com impactos ambientais e operacionais
E2	Ineficiência do sistema de drenagem superficial	Subdimensionamento hidráulico e ausência de manutenção	Sobrecarga do sistema, erosão progressiva e carreamento de material	Erosão superficial com impactos ambientais e operacionais

Tabela 6 – Subsistema F: Sistema de Monitoramento

ID	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
F1	Falha de detecção de condições críticas	Instrumentação inadequada	Não identificação de anomalias ou estados críticos	Perda de capacidade de detecção de condições críticas
F2	Interpretação inadequada dos dados	Análise técnica deficiente	Resposta tardia a sinais de instabilidade	Perda de capacidade de detecção de condições críticas
F3	Falta de calibração da instrumentação	Ausência de manutenção	Leituras imprecisas ou não confiáveis	Perda de capacidade de detecção de condições críticas

Tabela 7 – Subsistema G: Estruturas de Contenção de Cheias ou Sedimentos

ID	Modo de Falha	Causa Raiz	Efeito	MUE
G1	Falha estrutural ou funcional	Degradação ou projeto inadequado	Vazamento de material	Vazamento com danos ambientais, sociais e regulatórios
G2	Colmatação progressiva	Manutenção insuficiente	Perda de capacidade de contenção	Vazamento com danos ambientais, sociais e regulatórios
G3	Subdimensionamento hidrológico	Eventos hidrológicos extremos	Transbordamento	Vazamento com danos ambientais, sociais e regulatórios

3.3 Análise dos Riscos: Matrizes de Probabilidade e Consequência

A análise dos riscos foi realizada por meio da avaliação integrada da probabilidade de ocorrência dos modos de falha e da severidade das consequências associadas [24], utilizando quatro matrizes independentes baseadas em Robertson e Shaw (2004). As matrizes foram estruturadas nos eixos: (i) meio biótico e uso do solo; (ii) regulatório; (iii) imagem e percepção pública; e (iv) saúde e segurança (Figura 2).

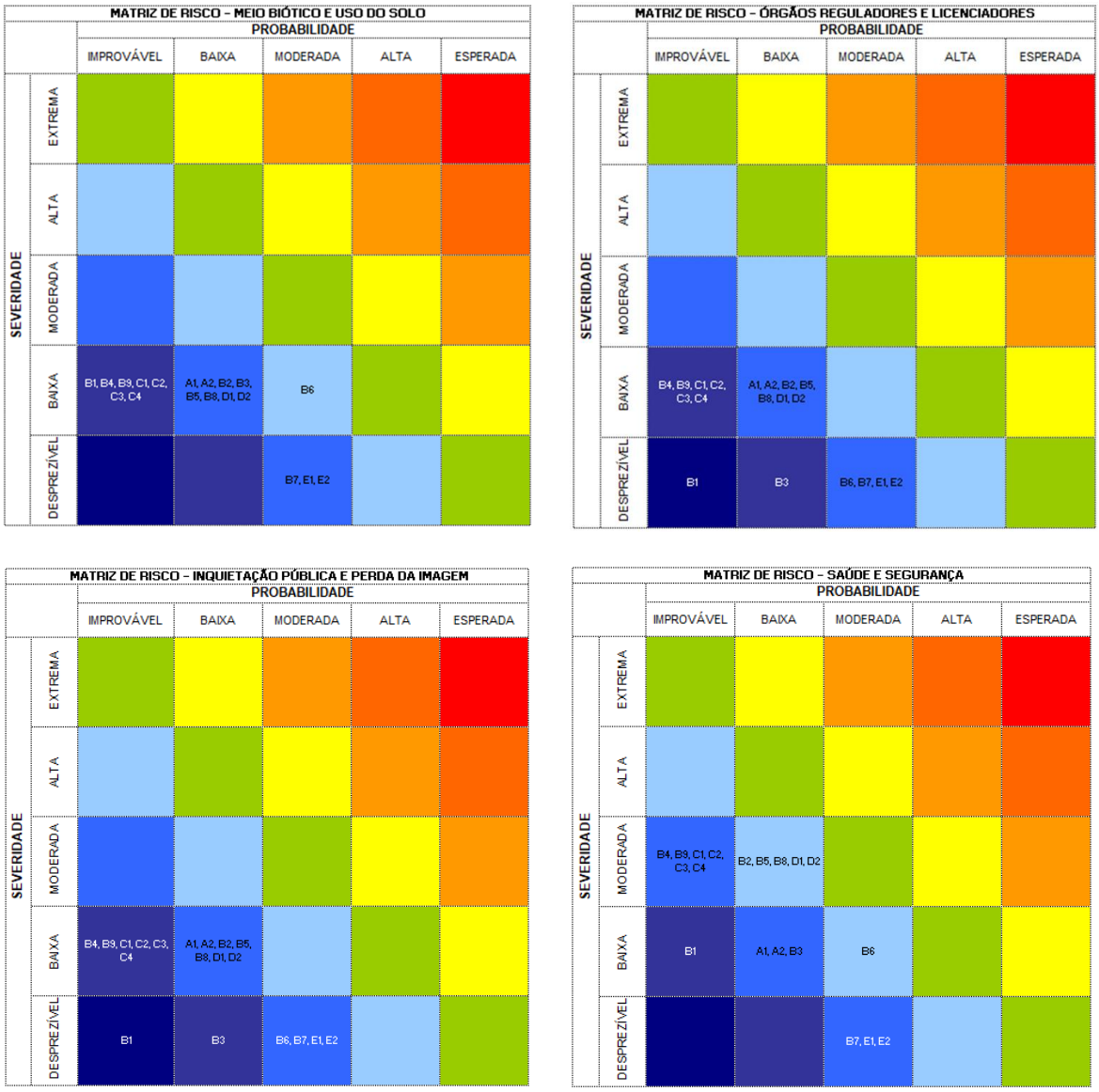


Figura 2 – Matrizes de risco hipotéticas para um PGR de Pilha de Rejeito

A segmentação destes quatro eixos, assegura a consistência na comparação entre modos de falha e subsistemas, definindo sua aplicação pelas Tabelas 8 e 9. O uso de classes discretas e critérios explícitos reduz a subjetividade, aumentando a reprodutibilidade e a rastreabilidade do processo analítico [25].

Tabela 8 – Severidade dos efeitos (Adaptado de [19])

Classe	Meio Biótico e Uso do Solo	Regulatório e Licenciamento	Percepção Pública	Saúde e Segurança
(E) Extrema	Alterações ambientais permanentes e de grande abrangência	Interrupção ou restrição severa das atividades	Repercussão ampla, em âmbito nacional ou internacional,	Ocorrência de perdas humanas

Classe	Meio Biótico e Uso do Solo	Regulatório e Licenciamento	Percepção Pública	Saúde e Segurança
			com impactos relevantes	
(A) Alta	Alterações ambientais significativas, permanentes ou de grande escala reversível	Não conformidades frequentes e sanções expressivas	Repercussão política e institucional relevante	Ocorrências graves à integridade física, com possibilidade de perdas humanas
(M) Moderada	Alterações ambientais relevantes, porém reversíveis	Não conformidades pontuais e sanções de menor porte	Atenção pública ocasional	Ocorrências com afastamento temporário
(B) Baixa	Alterações ambientais localizadas e de pequena escala	Não conformidade isolada, sem sanções relevantes	Repercussão pública limitada	Ocorrências leves
(D) Muito Baixa	Alterações ambientais desprezíveis ou não mensuráveis	Impacto regulatório desprezível	Ausência de repercussão pública	Sem registros de lesões

Tabela 9 – Probabilidade do evento (Adaptado de [19])

Classe	Probabilidade Anual	Frequência Típica
I – Improvável	< 0,01 %	Menor que 1 vez em 10 anos
B – Baixa	0,01 – 0,1 %	Aproximadamente 1 vez em 10 anos
M – Moderada	0,1 – 1 %	Aproximadamente 1 vez em 5 anos
A – Alta	1 – 10 %	Aproximadamente 1 vez em 2 anos
E – Esperada	> 10 %	Aproximadamente 1 vez por ano

3.4 Avaliação dos Riscos: Índice de Risco (RPN)

A avaliação dos riscos foi realizada por meio da integração entre o Índice de Prioridade de Risco (RPN) e o enquadramento segundo o princípio ALARP, permitindo a interpretação conjunta da criticidade e aceitabilidade dos cenários. O RPN foi calculado pelo produto da Severidade (S), Probabilidade (P) e Detectabilidade (D), cada um mensurado de 1 a 5, obtidos pelos eixos de Robertson e Shaw (2004).

A severidade representa a magnitude das consequências associadas aos MUEs; a probabilidade considera mecanismos físicos, histórico operacional e condições

ambientais; e a detectabilidade reflete a capacidade de identificação precoce de condições críticas, influenciada por instrumentação, monitoramento e governança [26]. A inclusão da detectabilidade aumenta a sensibilidade da análise, especialmente para mecanismos de evolução rápida.

A Tabela 10 apresenta um exemplo de aplicação do RPN, evidenciando maiores valores em modos de falha associados à liquefação e à instrumentação, nos quais a combinação de alta severidade e baixa detectabilidade resulta em maior criticidade.

Tabela 10 – Classificação hipotética do Índice de Prioridade de Risco (RPN)

ID	Modo de Falha	(S)	(P)	(D)	RPN
A1	Gestão – Falha de governança técnica	3	2	2	12
A2	Gestão – Falha na tomada de decisão	3	2	3	18
B1	Maciço – Instabilidade de taludes	4	2	2	16
B2	Maciço – Sobrecarga estrutural	4	2	2	16
B3	Maciço – Heterogeneidade estrutural	3	2	3	18
B4	Maciço – Erosão interna no maciço	4	1	4	16
B5	Maciço – Saturação de taludes	4	2	3	24
B6	Maciço – Trincamento por secas prolongadas	2	3	2	12
B7	Maciço – Erosão e escorregamentos superficiais	3	3	2	18
B8	Maciço – Liquefação estática	3	2	5	30
B9	Maciço – Liquefação cíclica	5	1	4	20
C1	Fundação – Reativação estrutural geológica	4	1	4	16
C2	Fundação – Ruptura por poropressão elevada	5	1	3	15
C3	Fundação – Erosão interna na fundação	4	1	4	16
C4	Fundação – Liquefação da fundação	5	1	5	25
D1	Drenagem Interna – Deformação dos drenos	3	2	3	18
D2	Drenagem Interna – Ineficiência funcional	4	2	3	24
E1	Drenagem Superficial – Falha na proteção de taludes	2	3	2	12
E2	Drenagem Superficial – Degradação do sistema	2	3	2	12
F1	Instrumentação – Falha de detecções críticas	4	2	5	40
F2	Instrumentação – Interpretação inadequada de dados	4	2	4	32
F3	Instrumentação – Falta de calibração	3	3	4	36
G1	Estruturas Auxiliares – Falha estrutural ou funcional	4	2	3	24
G2	Estruturas Auxiliares – Colmatação progressiva	3	3	3	27
G3	Estruturas Auxiliares – Subdimensionamento	4	2	4	32

A análise da Tabela 10 evidencia que modos de falha associados à liquefação (B8, B9, C4) concentram os maiores valores de RPN. A liquefação de rejeitos constitui mecanismo crítico de falha em pilhas, particularmente em climas tropicais onde ciclos de saturação-dessaturação, eventos pluviométricos intensos e carregamentos cíclicos

amplificam a suscetibilidade [5,6]. Diferencia-se em duas categorias: liquefação estática (B8) e cíclica (B9), ambas resultando em perda abrupta de resistência ao cisalhamento e grandes deformações [16].

A liquefação estática ocorre sob carregamento monotônico em materiais granulares saturados, quando o aumento de poropressão reduz efetivamente as tensões normais [15]. Em pilhas de rejeito, esse mecanismo é acionado por alteamentos rápidos, elevação do nível freático por falhas de drenagem ou eventos pluviométricos extremos. A suscetibilidade é amplificada pela heterogeneidade granulométrica, baixa compactação e presença de finos, características frequentes em rejeitos de mineração [4]. Segundo diretrizes do GISTM [11] e boletins da ICOLD [12], a avaliação requer ensaios de resistência não drenada (triaxial cíclico e monotônico) e análises de estabilidade com poropressões elevadas, especialmente em fundações e interfaces de alteamento.

A liquefação cíclica resulta do acúmulo progressivo de poropressão sob carregamentos repetidos, incluindo tráfego de equipamentos, vibrações operacionais e sismos induzidos por atividades de mineração [12]. Diretrizes internacionais enfatizam que esse mecanismo é particularmente crítico em rejeitos finos e saturados, onde a rigidez degrada progressivamente, reduzindo a capacidade de dissipação de poropressão [12]. O acúmulo de poropressão pode levar à mobilização de escorregamentos profundos ou ruptura global, mesmo sob carregamentos moderados [4].

A análise de liquefação integra avaliações de: (i) suscetibilidade granulométrica e mineralógica; (ii) estado de tensões efetivas e poropressões *in situ*; (iii) histórico de carregamento e ciclos de saturação; (iv) resistência não drenada por meio de ensaios laboratoriais; e (v) análises numéricas de estabilidade com poropressões dinâmicas [19]. A detectabilidade de liquefação é particularmente desafiadora, pois a evolução pode ser rápida e os sinais precursores (aumento de poropressão, redução de rigidez) frequentemente não são capturados por instrumentação convencional [3]. Isso justifica os elevados valores de RPN observados na Tabela 10 (B8: 30; B9: 20; C4: 25), evidenciando que riscos de liquefação permanecem predominantemente no domínio crítico mesmo com probabilidade moderada, devido à combinação de alta severidade e baixa detectabilidade [26].

Essa caracterização técnica de liquefação reforça a necessidade de abordagens integradas na gestão de riscos, superando análises prescritivas isoladas e alinhando-se ao princípio ALARP [27].

Essa análise integrada de mecanismos críticos é complementada pela interpretação do RPN segundo o princípio ALARP [27], que classifica os riscos em três domínios: (i) aceitável; (ii) tolerável sob ALARP; e (iii) inaceitável. Cenários com severidade elevada mantêm criticidade relevante mesmo com baixa probabilidade. Adicionalmente, riscos classificados como toleráveis podem demandar gestão ativa quando associados a limitada detectabilidade, reforçando a necessidade de controles preventivos robustos.

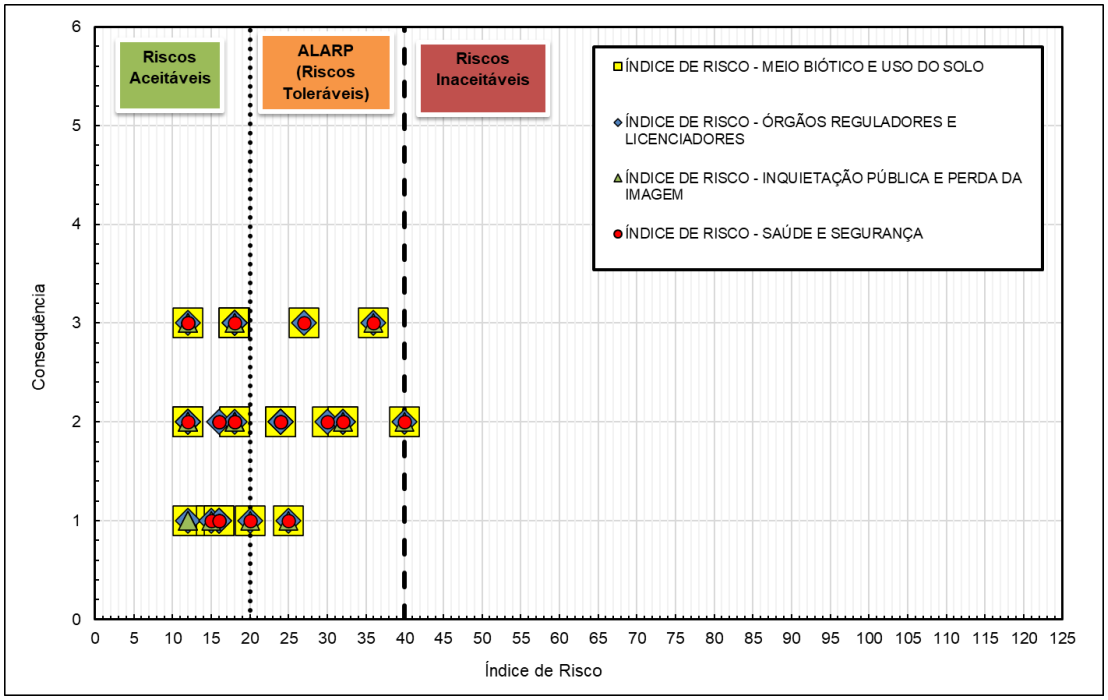


Figura 3 – Identificação hipotética do domínio ALARP para uma Pilha de Rejeitos

A Figura 3 evidencia que modos de falha B8, B9 e C4 (liquefação) situam-se predominantemente na zona inaceitável ou no limite superior da zona tolerável, reforçando a necessidade de controles preventivos robustos.

Os limites de RPN adotados constituem critérios internos de priorização, não normativos, sendo sua interpretação realizada de forma integrada ao ALARP, em alinhamento com a ABNT NBR ISO 31000 e diretrizes internacionais aplicáveis a sistemas geotécnicos de alto risco. A integração entre RPN e ALARP proporciona, assim, uma avaliação mais consistente com a natureza sistêmica e não linear dos riscos em estruturas geotécnicas.

3.5 Tratamento do Risco: Controles Críticos (*Critical Control Management*)

O tratamento dos riscos é conduzido por meio da identificação, implementação e verificação de Controles Críticos, conforme diretrizes do ICMM [13], aplicados aos modos de falha capazes de originar Eventos Indesejados Principais (MUEs). Particularmente para modos de falha associados à liquefação (B8, B9, C4), os controles críticos devem enfatizar monitoramento intensivo de poropressões, restrição operacional durante períodos de saturação elevada e manutenção rigorosa de sistemas de drenagem, conforme diretrizes do GISTM e ANCOLD 2019.

Cada controle crítico dispõe de requisitos mínimos de desempenho, incluindo: (i) definição de sua função e do mecanismo de falha; (ii) requisitos mensuráveis de desempenho; (iii) definição de responsáveis pela sua implementação e verificação; (iv) estabelecimento de rotinas de inspeção, monitoramento e manutenção; e (v) definição de gatilhos de ação (*Trigger Action Response Plans* – TARPs), que indiquem as respostas operacionais diante da perda de efetividade do controle (Tabela 11).

Tabela 11 – Ficha simplificada de um Controle Crítico (CC)

<table>
<tr><td colspan="2">MUE:
Falha sistêmica com potencial de danos ambientais, socioeconômicos e legais</td><td>Modos de Falha:
A1, A2</td><td>Nº MUE:
MUE01</td><td>Nº Controle Crítico:
CC1</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="3">Objetivo do controle crítico:
Assegurar que decisões técnicas críticas sejam tomadas de forma estruturada, rastreável e alinhada ao projeto, prevenindo desvios, alterações não controladas e respostas tardias.</td><td>Status:</td><td>Futuro</td></tr>
<tr><td>Tipo:</td><td>Preventivo</td></tr>
<tr><td>Classificação:</td><td>Procedimento</td></tr>
<tr><td>Requisitos de desempenho:</td><td>Implementação:</td><td colspan="3">Monitoramento e Verificação:</td></tr>
<tr><td>• 100% da documentação técnica crítica aprovada antes da execução
• 100% das decisões técnicas críticas formalmente registradas
• 100% das mudanças tratadas via MOC
• 0% de execução fora dos limites de projeto
• 100% dos riscos críticos incorporados às decisões</td><td>• Sistema formal de gestão documental com rastreabilidade;
• Matriz RACI de responsabilidades técnicas;
• Gate reviews multidisciplinares obrigatórios;
• Processo formal de gestão de mudanças (MOC).</td><td colspan="3">Antes de cada marco do projeto ou trimestral:
• Checklists de conformidade documental
• Registros formais de decisões técnicas
• Registros de MOCs e análises de risco
• Auditorias periódicas de governança técnica
• Revisões técnicas por marcos do projeto</td></tr>
<tr><td>TARPs (Gatilhos e Ações):</td><td>Responsabilidades:</td><td colspan="3">Nota técnica:</td></tr>
<tr><td>• Execução sem documentação → paralisação imediata;
• Alterações sem MOC → bloqueio e reavaliação;
• Decisão sem responsável técnico → suspensão;
• Desvios projeto–execução → revisão obrigatória.</td><td>• Dono: Engenheiro Geotécnico Responsável
• Implementação: Projeto e Operação
• Verificação: Auditoria Técnica Interna
• Apoio: Meio Ambiente, Planejamento.</td><td colspan="3">• Este é um controle estruturante; sua falha compromete a eficácia dos demais controles e a integridade da gestão de riscos.</td></tr>
</table>

Para cada MUE, os controles são classificados em preventivos (atuam na redução da probabilidade) e detectivos/mitigadores (atuam na identificação precoce ou redução das consequências), sendo priorizados aqueles associados a riscos classificados como inaceitáveis ou toleráveis sob ALARP. A gestão dos controles críticos requer ainda a verificação contínua de sua eficácia para cada MUE, por meio de auditorias técnicas, validação de dados de instrumentação, inspeções de campo e revisão periódica das premissas de projeto e operação.

3.6 Monitoramento do Risco e Comunicação

O monitoramento do risco é contínuo e visa verificar a eficácia dos controles, identificar desvios e detectar precocemente a evolução de mecanismos de falha. É realizado pela integração de inspeções, auditorias, indicadores e instrumentação geotécnica, com análise orientada à identificação de tendências, anomalias e proximidade de limites críticos.

A interpretação dos dados deve ocorrer de forma integrada, correlacionando variáveis geotécnicas, hidráulicas e operacionais, com suporte de níveis de alerta e gatilhos operacionais (TARPs) para definição de ações.

A comunicação do risco assegura a transmissão clara, tempestiva e rastreável das informações aos níveis decisórios, incluindo reporte de anomalias e escalonamento de eventos críticos. Deve ser estruturada para garantir alinhamento entre as áreas envolvidas, evitando ambiguidades e atrasos hierárquicos na resposta ao risco.

4. CONCLUSÕES

A metodologia proposta mostrou-se adequada como ferramenta estruturante para Processos de Gestão de Riscos (PGR) aplicáveis a pilhas de rejeito suscetíveis à liquefação [4]. A integração entre a ABNT NBR ISO 31000, a FMEA adaptada, os MUEs e o enquadramento ALARP permitiu representar de forma consistente a complexidade técnica e organizacional dessas estruturas, assegurando rastreabilidade e coerência ao longo do processo.

A incorporação da detectabilidade como parâmetro explícito aumentou a sensibilidade na priorização dos riscos, especialmente para mecanismos de evolução rápida ou difícil monitoramento. O tratamento por meio de Controles Críticos, conforme diretrizes do *International Council on Mining and Metals*, estabeleceu base estruturada para prevenção e mitigação, com definição de desempenho, responsabilidades e gatilhos de ação.

Modos de falha associados à liquefação concentram maior criticidade, evidenciando a dominância da severidade e da detectabilidade no processo decisório. A análise integrada de suscetibilidade granulométrica, poropressões dinâmicas e histórico de carregamento, conforme diretrizes do GISTM, ICOLD e ANCOLD 2019, reforça a necessidade de controles críticos específicos e monitoramento intensivo para esse mecanismo, particularmente em climas tropicais onde variabilidade hidrológica amplifica riscos. Essa abordagem alinha-se, no plano normativo nacional, às

metodologias de avaliação de liquefação estática e cíclica introduzidas pelo Anexo A da ABNT NBR 13028-3:2025, que consolidam tais análises como requisito de projeto para pilhas de rejeitos desaguados. A estruturação de tratamento, monitoramento e comunicação, alinhada à ISO 31000 e ao princípio ALARP, estabelece assim uma abordagem integrada e rastreável, superando análises prescritivas isoladas e fornecendo suporte objetivo à governança e à segurança de pilhas de rejeito ao longo de seu ciclo de vida [22].

5. PALAVRAS-CHAVE

Pilhas de Rejeito, Controles Críticos, ISO 31000, ALARP, Liquefação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ARAUJO, F.; CRUZ, C. O. (2022). Avaliação da Maturidade na Gestão de Segurança de Barragens de Rejeitos. Holos, v. 6. p. 1 -19. Brasil.

[2] FRANKS, D. M., et al, (2021). Tailings Facility Disclosures Reveal Stability Risks. Sci Rep. v. 11, p. 5353. [S.L]

[3] HUDSON-EDWARDS, K.A. et al, (2024). Tailings Storage Facilities, Failures And Disaster Risk. Nat Rev Earth Environ. v. 5, p. 612–630. [S.L]

[4] CHOVAN K. et al., (2021). A Risk Assessment Tool For Tailings Storage Facilities. Canadian Geotechnical Journal. v. 58. p. 1898-1914. Canadá.

[5] SU C. et al., (2024). Tailings Storage Facilities In China: Historical Failure Incidents, Existing Status, and Database-Driven Quantitative Risk Assessment. International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 114. p. 104973. [S.L]

[6] VINET, L. et al., (2025). Risk Management Model for Tailings Storage Facilities in Chile: an Approach from Geological and Mining Engineering and the Regulatory Framework. Mining. v. 5, p. 80. [S.L]

[7] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM (2022) – Resolução ANM nº 95, de 7 de Fevereiro de 2022. Brasília, Brasil.

[8] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM (2025) – Resolução ANM nº 220, de 15 de Janeiro de 2025. Diretrizes para Gestão de Segurança de Estruturas de Mineração, incluindo Barragens e Pilhas de Rejeito. Brasília, Brasil.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2025) – NBR 13028-3: Disposição de rejeitos desaguados em pilhas. Rio de Janeiro, Brasil.

[10] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO (2018) – ISO 31000: Risk Management — Guidelines. Genebra, Suíça.

[11] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP; INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS – ICMM; PRINCIPLES FOR RESPONSIBLE INVESTMENT – PRI. (2020) – Global Industry Standard on Tailings Management. Londres, Reino Unido.

[12] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD (2019) – Tailings

Dams: Risk Assessment and Management. Paris, França.

[13] INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS – ICMM (2021) – Position Statement on Tailings Governance. Londres, Reino Unido.

[14] UNITED NATIONS (2011) – Guiding Principles on Business and Human Rights. Genebra, Suíça.

[15] AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS – ANCOLD (2019) – Guidelines on Tailings Dams: Planning, Design, Construction, Operation and Closure. Melbourne, Austrália.

[16] JEFFERIES, M.; BEEN, K. (2016) – Soil Liquefaction: A Critical State Approach. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental. v. 142, Estados Unidos.

[17] OWEN, J. R. et al., (2020) – Catastrophic Tailings Dam Failures and Disaster Risk Disclosure. International Journal of Disaster Risk Reduction. v. 42, p. 101361. Brisbane, Australia. [S.L]

[18] INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS – ICMM (2015) – Health and Safety Critical Control Management – Good Practice Guide. Londres, Reino Unido.

[19] ROBERTSON, A., SHAW, S. (2004) – Risk Management for Major Geotechnical Structures on Mines, 11th British Columbia MEND Metal Leaching/Acid Rock Drainage Workshop. Vancouver, Canadá.

[20] DUTRA, P. et al. (2024) – Modified FMEA for Risk Management in Geotechnical Structures During Hydraulic Circuit Filling of a Hydroelectric Power Plant. Soils and Rocks. V. 47, p. e2024014422. Brasil.

[21] JYOTI (2018) – A State-Of-The-Art Review of FMEA/FMECA Including Patentes. International Journal of Engineering Research in Computer Science and Engineering. v. 5, p. 4, Índia.

[22] SCHAFER, H. L. et al., (2021) – A Failure Modes and Effects Analysis Framework for Assessing Geotechnical Risks of Tailings Dam Closure, Minerals. v. 11, p. 1234. Suíça.

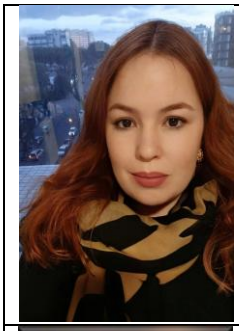
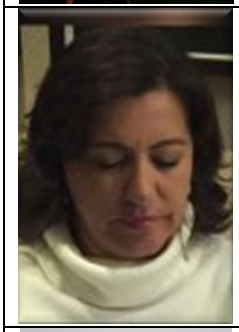
[23] IVANČAN, J. et al. (2021) – New FMEA Risks Ranking Approach Utilizing Four Fuzzy Logic Systems, *Machines*. [S.L]

[24] MENČÍK, J. (2016) – Failure Modes and Effects Analysis. Concise Reliability for Engineers. Czech Republic.

[25] ALEKSIĆ, A. et al. (2025) – Failure Mode and Effects Analysis Integrated with Multi-Attribute Decision-Making Methods Under Uncertainty: A Systematic Literature Review, Mathematics. [S.L]

[26] ZANDI, P. et al. (2020) – Agricultural Risk Management Using Fuzzy TOPSIS Analytical Hierarchy Process (AHP) and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Agriculture. v. 10, p. 504. Suíça.

[27] MASELLI, G. et al. (2021) – ALARP Criteria to Estimate Acceptability and Tolerability Thresholds of the Investment Risk, Applied Sciences. [S.L]

	**Luisa de Moura LEÃO** Engenheira Civil Geotécnica, doutora em Geotecnia (UFOP) e mestra em Saneamento e Geotecnia Ambiental (UFLA). Possui 8 anos de experiência em geotecnia aplicada à mineração, com atuação em segurança de barragens e pilhas, fechamento de minas, modelagem numérica e gestão de riscos com foco climático e normativo.
	**Marta Aparecida Sawaya MIRANDA** Geóloga/Geotécnica, mestra em Engenharia de Barragens (UFOP) e graduada em Geologia (UFMG). Possui mais de 20 anos de experiência em geotecnia de mineração, com atuação em segurança, auditoria de barragens, projetos de pilhas e descaracterização, incluindo estudos geológico-geotécnicos, hidráulicos e de liquefação. Auditora cadastrada na FEAM e ANM.
	**Lúcio Miranda CAMÊLO** Engenheiro de Minas (UFMG), M.Eng. em Engenharia Geotécnica (PUC Minas), especialista em barragens de rejeitos e membro da CBRR. Possui 13 anos de experiência em consultoria mineral, com atuação em planejamento de lavra, projetos geotécnicos, estudos de dambreak/stackbreak e estudos ambientais.
	**Marconi Bicalho CESCO** Engenheiro de Minas (UFMG), M.Eng. em Engenharia Geotécnica (PUC Minas) e mestrando em Engenharia Mineral (UFOP). Possui 13 anos de experiência em mineração, com atuação em gestão e operação de mina, planejamento de lavra e projetos de mineração e geotecnia.
	**Letícia Thomaz de Souza VIEIRA** Graduanda em Engenharia de Minas (UFMG) e técnica em Edificações (CEFET-MG). Atua no apoio a estudos geotécnicos, análise de dados e elaboração de materiais técnicos, com foco em segurança.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

INFLUÊNCIA METODOLÓGICA DOS ENSAIOS REOMÉTRICOS EM ESTUDOS DE RUPTURA HIPOTÉTICA DE BARRAGENS DE REJEITOS

Gabrielle SIMPLICIO
Química Industrial - Potamos Engenharia e Hidrologia Ltda.

Marina GOUVÊA
Engenheira Ambiental - Potamos Engenharia e Hidrologia Ltda.

Rodrigo BARBOSA
Engenheiro Civil - Potamos Engenharia e Hidrologia Ltda.

Márcio RESENDE
Engenheiro Civil - Potamos Engenharia e Hidrologia Ltda.

Ana Júlia REZENDE

Engenheira Ambiental – Potamos Engenharia e Hidrologia Ltda.

RESUMO

Este estudo avalia a influência dos parâmetros reológicos obtidos em ensaios reométricos rotacionais, realizados sob condições de tensão de cisalhamento controlada (CSS) e taxa de cisalhamento controlada (CSR), na modelagem numérica da propagação do escoamento de rejeitos em cenário de ruptura hipotética de barragem. A literatura indica que ensaios CSS são mais adequados para a determinação da tensão de escoamento. Em contraste, ensaios CSR são amplamente utilizados na avaliação do transporte de polpas em dutos e, atualmente, em estudos de ruptura de barragens no Brasil. Os parâmetros experimentais de tensão de cisalhamento e viscosidade foram ajustados ao modelo plástico de Bingham e incorporados ao modelo numérico RiverFlow-2D®, para simular a propagação do volume mobilizado na ruptura hipotética da barragem de rejeitos. A comparação entre os ajustes do modelo reológico e os dados experimentais indicou que o método CSR tende a subestimar a relação entre viscosidade e taxa de cisalhamento, resultando em maior mobilização dos rejeitos. Foi observado que parâmetros estimados a partir de ensaios CSR tendem a superestimar o alcance das áreas afetadas e as vazões de pico, além de subestimar o tempo de chegada da onda de escoamento. Por outro lado, os parâmetros estimados a partir de ensaios CSS fornecem uma representação física mais consistente do comportamento dos rejeitos mobilizados que, alinhada aos dados experimentais, permite uma avaliação mais realista dos impactos potenciais nos vales a jusante.

ABSTRACT

This study evaluates the influence of rheological parameters obtained from rotational rheometric tests under controlled shear stress (CSS) and controlled shear rate (CSR) conditions in the hypothetical tailings flow numeric modeling. The literature suggests that CSS tests are better for determining the yield stress, and CSR tests, in contrast, are widely applied to evaluating slurry transport in pipes, and in current dam break studies in Brazil. The experimental shear stress and viscosity parameters were adjusted to the Bingham plastic model and incorporated into the RiverFlow-2D® numerical modeling, in which the propagation of the mobilized volume during a hypothetical dam failure was simulated. The comparison between the rheological model adjustments and the experimental data suggests that CSR methods tend to underestimate the relationship between viscosity and shear rate, resulting in higher tailings mobility. It was observed that CSR test estimated parameters tend to overestimate the extent of the affected areas and the peak flow rates, while also underestimating the wave arrival time. In contrast, CSS test estimated parameters provide a more consistent physical representation of tailings mobilization, allowing for a reliable evaluation of potential downstream impacts, in agreement with experimental observations.

1. INTRODUÇÃO

Barragens são amplamente utilizadas no Brasil para a disposição final de rejeitos de mineração e impõem desafios relevantes à segurança e à gestão de riscos. Entre esses desafios, destaca-se a possibilidade de ruptura, que pode provocar o deslocamento de grandes volumes de material ao longo dos vales a jusante. Os impactos de um evento dessa natureza são avaliados por meio de estudos de ruptura hipotética, nos quais a estimativa da área inundada depende diretamente das propriedades do rejeito mobilizado [1]. Durante um rompimento, os rejeitos apresentam comportamento de fluido não newtoniano, cujas propriedades são descritas por parâmetros reológicos [2].

A heterogeneidade dos rejeitos resulta em variações significativas de suas propriedades reológicas. Estudos indicam relação direta entre a tensão de escoamento e a área inundada em cenários avaliados pelo modelo de Bingham [3]. No entanto, os parâmetros reológicos desse modelo dependem fortemente das condições de ensaio e técnicas adotadas [4]. Além disso, esses parâmetros ainda são pouco investigados e, com frequência, são estimados a partir de critérios de projeto de espessadores e dutos, o que introduz incertezas na modelagem do escoamento [5].

Os parâmetros reológicos podem ser determinados por ensaios reométricos rotacionais com tensão de cisalhamento controlada (CSS) ou taxa de cisalhamento controlada (CSR) [6]. O método CSS é o mais adequado para determinação da tensão de escoamento, enquanto o método CSR é indicado quando se busca reproduzir condições de escoamento associadas a processos industriais ou ao transporte de materiais em tubulações.

Nesse contexto, a escolha adequada da metodologia de ensaio é essencial para alcançar a confiabilidade da modelagem hidrodinâmica da propagação da onda de ruptura. Este estudo avalia a influência dos parâmetros reológicos obtidos em ensaios reométricos rotacionais, sob condições de CSS e CSR, na modelagem numérica da propagação do escoamento de rejeitos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios reométricos foram realizados para uma amostra de rejeito de minério de ferro, utilizando um reômetro Anton Paar modelo MCR 302e, equipado com geometria de palheta (*vane*). Foram conduzidos ensaios com tensão de cisalhamento controlada (CSS) e ensaios com taxa de cisalhamento controlada em rampa (CSR), para concentrações volumétricas (CV) de 30%, 35%, 40% e 42%.

Para simulação da propagação da onda de ruptura hipotética, considerando as diferentes metodologias de interpretação dos ensaios reométricos, foi realizado um estudo de caso com emprego do modelo hidrodinâmico RiverFlow-2D®. O modelo utiliza malhas de cálculo não estruturadas, capazes de representar adequadamente a geometria do terreno. A distribuição dos vértices da malha variou entre 5 e 30 m, totalizando 1.174.747 elementos.

Os coeficientes de rugosidade foram atribuídos com base em valores reportados na

literatura técnica, associados ao julgamento de engenharia aplicado ao mapeamento do uso e ocupação do solo. Para a representação da morfologia do vale a jusante, utilizou-se um modelo digital de terreno obtido por perfilamento a laser de precisão (LiDAR), com curvas de nível espaçadas a cada metro. O volume mobilizado na ruptura hipotética foi de aproximadamente 5 Mm^3, com CV de 42,8%.

Foram simulados cenários de propagação com a variação da tensão de escoamento e viscosidade aparente, obtidas pelos diferentes métodos de ensaio, mantendo-se os demais parâmetros de entrada no modelo, tais como a topografia, volume mobilizado, malha computacional, rugosidade e tempo de simulação, de modo que as diferenças observadas nos resultados pudessem ser atribuídas unicamente à variação das propriedades reológicas do material propagado.

A simulação foi realizada ao longo de vales secos, sem a consideração de vazões de base, ou seja, sem influência de diluição pela água preexistente no vale sobre os parâmetros reológicos do material escoado. Buscou-se assim, avaliar especificamente a sensibilidade da propagação aos parâmetros reológicos derivados de diferentes metodologias de ensaio.

Foram avaliados os seguintes cenários, considerando um tempo de simulação de 24 horas:

- Cenário A: parâmetros reológicos obtidos a partir de ensaios com controle de tensão de cisalhamento (CSS);
- Cenário B: parâmetros reológicos obtidos a partir de ensaios com controle de taxa de cisalhamento (CSR);
- Cenário C: fluido equivalente à água, sem presença de rejeitos, adotado apenas para efeito de comparação da extensão da inundação.

Os parâmetros de entrada referentes às propriedades reológicas do fluido nos Cenários A e B correspondem à tensão de escoamento (τ_y) e à viscosidade aparente (*k*). Esses parâmetros foram obtidos por meio do ajuste dos dados experimentais ao modelo reológico de Bingham.

3. RESULTADOS

Os parâmetros reológicos obtidos por meio da interpretação dos resultados de ensaios são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros do modelo de Bingham para os ensaios CSS (Cenário A) e CSR (Cenário B).

Cenário A			**Cenário B**		
CV (%)	τ_y (Pa)	*k* (Pa·s)	CV (%)	τ_y (Pa)	*k* (Pa·s)
30	258	0,426	30	32	0,065
35	486	0,790	35	72	0,370
40	1729	1,296	40	133	0,462
42	2426	1,835	42	174	0,570

Observa-se que, para todos os valores de CV avaliados, os ensaios conduzidos sob controle de tensão de cisalhamento (Cenário A) resultaram em valores de τ_y significativamente superiores aos obtidos nos ensaios com controle de taxa de cisalhamento (Cenário B).

As simulações hidráulicas evidenciaram diferenças marcantes no comportamento do escoamento. Nos Cenários B e C são alcançadas maiores distâncias em menor tempo e com vazões máximas mais elevadas (Figura 1).

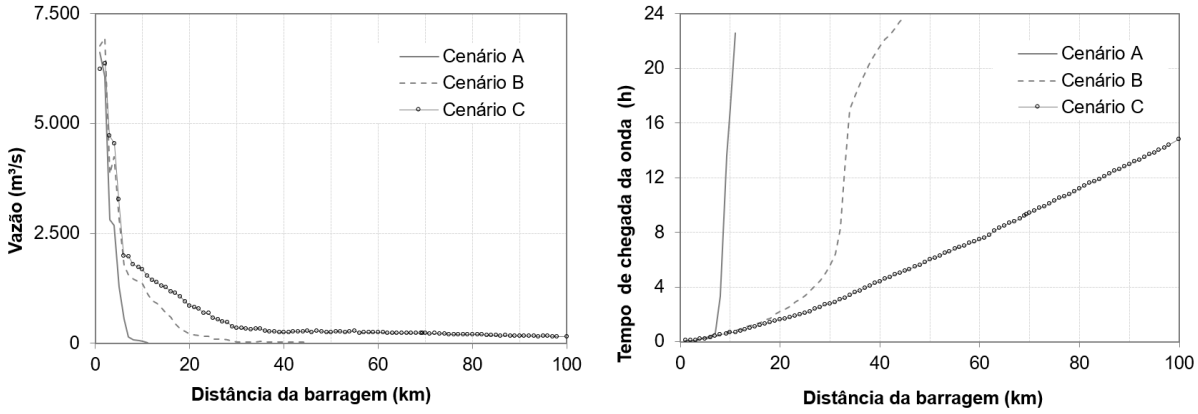


Figura 1: Vazão máxima e tempo de chegada da onda.

A análise espacial das áreas inundadas, apresentada na Figura 2, reforça essas diferenças. O Cenário A resultou em uma área inundada com extensão menor em relação ao Cenário B. No Cenário A, a propagação da massa mobilizada se estabilizou a aproximadamente 11 km a jusante do eixo da barragem, enquanto no Cenário B o escoamento atingiu cerca de 45 km. No Cenário C (água) a propagação ultrapassou o domínio de simulação, excedendo 100 km.

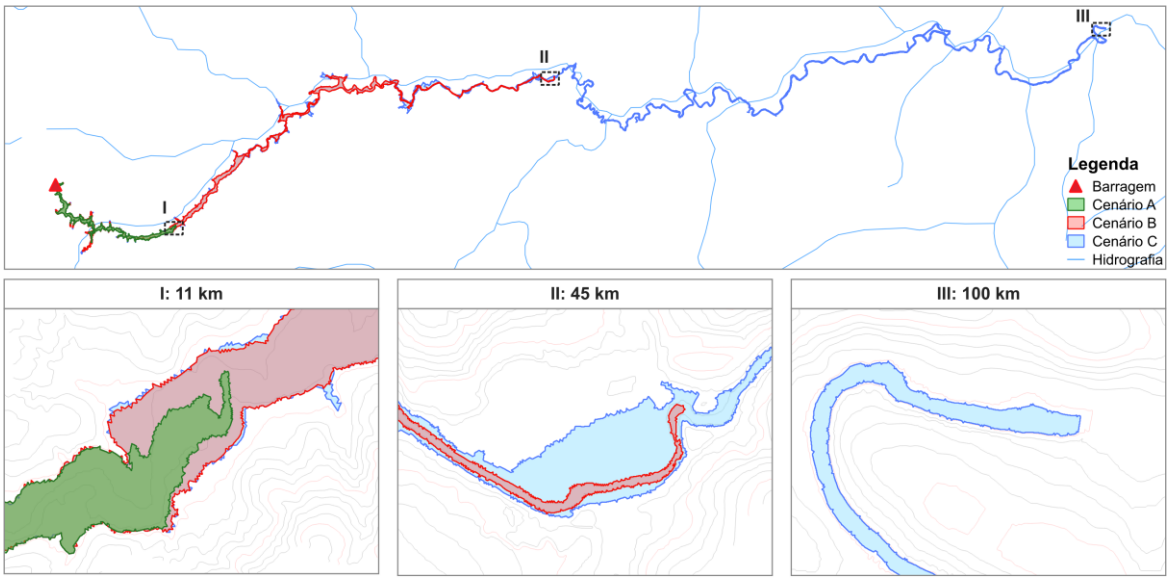


Figura 2: Áreas inundadas.

Na Figura 3 apresenta-se o ajuste entre o modelo reológico e os dados experimentais obtidos por meio de cada metodologia de ensaio para CV de 42%. Observa-se que o

método CSR tende a subestimar a relação entre a viscosidade e a taxa de cisalhamento, o que explica a maior mobilidade dos rejeitos no Cenário B.

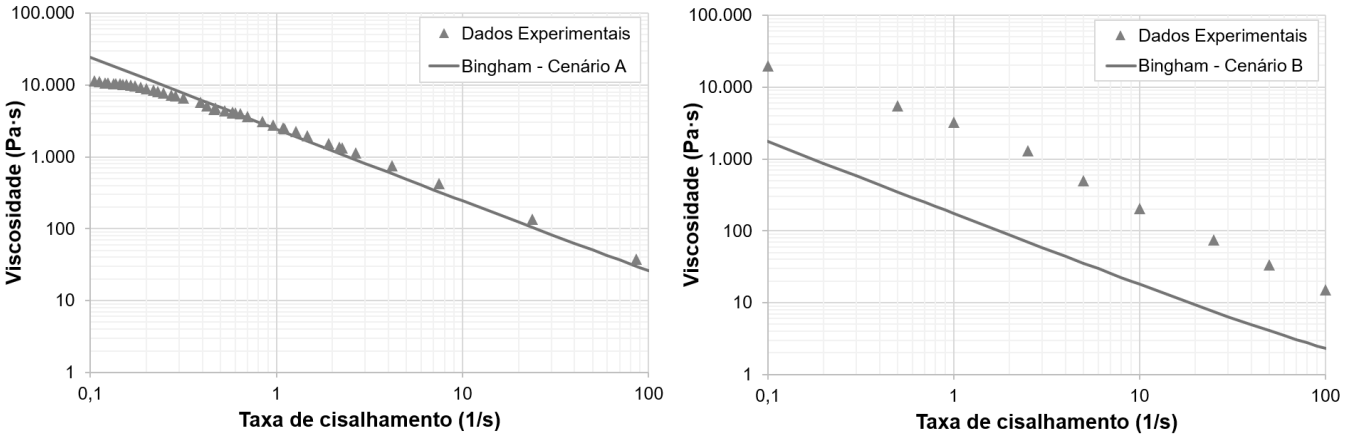


Figura 3: Ajuste do modelo de Bingham aos dados experimentais.

4. CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que a metodologia adotada nos ensaios reométricos influencia de forma decisiva a estimativa dos parâmetros do modelo reológico e, por consequência, a resposta hidrodinâmica simulada para cenários hipotéticos de ruptura de barragem de rejeitos. Os ensaios conduzidos sob controle de tensão (CSS) produziram valores de tensão de escoamento e viscosidade aparente substancialmente superiores aos obtidos com controle de taxa de cisalhamento (CSR).

Na modelagem numérica aplicada ao estudo de caso, essas diferenças resultaram em comportamentos distintos de propagação do escoamento. Nos ensaios CSR, usualmente empregados em estudos de transporte de polpa em tubulação, os parâmetros estimados para o modelo reológico subestimaram a relação entre a viscosidade e taxa de cisalhamento observada experimentalmente. Essa subestimação resulta em um maior alcance das áreas afetadas por uma eventual ruptura e em menores tempos de chegada da onda, o que amplia os desafios enfrentados pelo empreendedor e pelas autoridades competentes na resposta a emergências. Embora seja uma abordagem mais conservadora, na medida em que potencializa os possíveis impactos de uma eventual ruptura, essa condição não representa de forma realista o comportamento físico do rejeito mobilizado.

Por outro lado, os parâmetros obtidos no ensaio CSS proporcionaram uma representação física mais compatível com o comportamento esperado de rejeitos mobilizados em eventos de ruptura, conforme evidenciado pela qualidade do ajuste aos dados experimentais. No presente estudo de caso, a adoção dessa metodologia resultou em menor alcance dos efeitos da ruptura e em maiores tempos de chegada da onda.

A superestimativa da mobilidade do material pode comprometer a definição de medidas de mitigação proporcionais ao risco efetivo, além de dificultar o planejamento da engenharia de contingência e a priorização de ações de resposta.

Como implicação prática, recomenda-se que estudos de ruptura hipotética adotem protocolos reológicos compatíveis com a natureza do material analisado, além de documentarem de forma padronizada os procedimentos experimentais e os critérios de ajuste adotados.

5. PALAVRAS-CHAVE

Ensaios reométricos, estudo de ruptura hipotética, barragem de rejeitos, fluido não newtoniano.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] JOANNA, C.H.; DENNIS, B.E. (2014) – “Dam breach tailings runout analysis”, CDA Annual Conference.

[2] CANADIAN DAM ASSOCIATION. (2021) – “Technical Bulletin: Tailings Dam Breach Analysis (2021 edition)”, Ottawa: Canadian Dam Association.

[3] MALENA LÚCIA, S.F.de M. (2022) – “Sensibilidade a parâmetros reológicos na modelagem de fluxo hiperconcentrado proveniente de rupturas de barragens de rejeitos de mineração”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, p.109, Belo Horizonte.

[4] JEONG, S. (2019) – “Shear Rate-Dependent Rheological Properties of Mine Tailings: Determination of Dynamic and Static Yield Stresses”, Appl.Sci, 9 (22), 4744.

[5] CLAUDIO, R. et al. (2023) – “Influence of tailings rheological parameters on the estimation of runout distances”, 1ST International Conference on Geotechnics of Tailings and Mine Waste, Ouro Preto.

[6] THOMAS, G.M. (2014) – “The Rheology Handbook”, 4ª Edition. Hanover: Vincentz Network.

[7] MINKYUNG, K. et al. (2005) – “Flow behaviour of tailings paste for surface disposal”, International Journal Mineral Processing, 77 (3): (193-153).



Gabrielle JUSTINIANO

Química Industrial pela Universidade Federal de Ouro Preto (2021), com especialização em Engenharia e Ciência dos Materiais. Experiência na área de Química, com ênfase em controle de qualidade, rotinas laboratoriais, caracterização de materiais e técnicas reológicas, atuando em processos industriais e estudos aplicados à geotecnia.

	**Marina GOUVÊA** Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais (2020). Experiência na área de recursos hídricos, com ênfase em estudos hidrológicos e hidráulicos, incluindo modelagens hidrodinâmicas, transporte de sedimentos, estudos de ruptura hipotética de barragens, estudos hidrogeoquímicos e verificação de estruturas hidráulicas.
	**Rodrigo BARBOSA** Engenheiro Civil especialista em Recursos Hídricos (1998) pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Experiência de mais de 25 anos em projetos de hidrologia, hidráulica e recursos hídricos. Atua na coordenação dos estudos hidrológicos e hidráulicos principalmente em estruturas ligadas à mineração e na elaboração de projetos executivos de obras de segurança em barragens.
	**Márcio RESENDE** Engenheiro Civil (1993), M.Sc Hidrologia e Hidráulica (2007) e D.Sc Calor e Fluidos (2014) pela UFMG. Experiência de mais de 30 anos em Engenharia de Recursos Hídricos aplicada a mineração, indústria, segurança de barragens, infraestrutura urbana e rodoviária.
	**Ana Júlia REZENDE** Engenheira Ambiental pela UFMG (2024), com especialização em Meio Ambiente e Energia pela IMT Mines Alès (2023). Ênfase em recursos hídricos, com experiência em modelagens hidrodinâmicas, transporte de sedimentos, estudos de ruptura hipotética de barragens, análise de dados, GIS e relatórios técnicos.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4 – MODOS DE FALHA E ANÁLISE DE RISCOS DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

INTERFERÊNCIAS GEOTÉCNICAS ENTRE ESTRUTURAS DE MINA: LIÇÕES APRENDIDAS E IMPLICAÇÕES PARA O PLANEJAMENTO INTEGRADO

Luisa de Moura LEÃO
Engenheira Civil Geotécnica, DSc. em Geotecnia
3EM Mineração e Geologia

Marta Sawaya MIRANDA
Engenheira Geóloga, MSc. em Engenharia de Barragens
3EM Mineração e Geologia

Lúcio Miranda CAMÊLO
Engenheiro de Minas, Esp. em Geotecnia e Engenharia de Barragens
3EM Mineração e Geologia

Marconi Bicalho CESCO
Engenheiro de Minas, Esp. em Engenharia Geotécnica
3EM Mineração e Geologia

Caio Araújo Borges CASTRO
Graduando em Engenharia de Minas
Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

O aumento da complexidade dos empreendimentos de mineração, aliado à intensificação produtiva, restrições espaciais e maior rigor regulatório, tem exposto limitações das abordagens geotécnicas tradicionais, geralmente baseadas na análise isolada de estruturas. Entretanto, barragens de rejeitos, pilhas de estéril, cavas e sistemas de drenagem compõem um sistema interdependente, no qual interações hidráulicas e mecânicas evoluem ao longo do tempo. Este trabalho investiga interferências geotécnicas entre estruturas de mineração por meio de estudos de caso reais, utilizando abordagem qualitativa e comparativa baseada em análise documental, reconstrução da evolução geométrica e operacional, e identificação de mecanismos dominantes. As interferências foram classificadas em quatro categorias: geométricas, hidráulicas, operacionais e estrutural-construtivas. Os resultados evidenciam padrões recorrentes em que o aumento da produção e as limitações de espaço atuam como principais vetores de risco, frequentemente associados à subavaliação das interações hidráulicas e à ausência de reavaliações globais de estabilidade frente a mudanças operacionais. Observa-se ainda que instabilidades inicialmente localizadas podem se propagar para estruturas adjacentes, ampliando o risco sistêmico. Conclui-se que a gestão geotécnica em mineração deve incorporar abordagens integradas e sistêmicas ao longo de todo o

ciclo de vida do empreendimento, como condição essencial para mitigação de riscos e aumento da resiliência das estruturas.

ABSTRACT

The increasing complexity of mining operations, combined with production intensification, spatial constraints, and stricter regulatory requirements, has exposed limitations in traditional geotechnical approaches, which are generally based on the isolated analysis of structures. However, tailings dams, waste rock piles, open pits, and drainage systems form an interdependent system in which hydraulic and mechanical interactions evolve over time. This study investigates geotechnical interferences among mining structures through real case studies, using a qualitative and comparative approach based on document analysis, reconstruction of geometric and operational evolution, and identification of dominant mechanisms. The interferences were classified into four categories: geometric, hydraulic, operational, and structural-constructive. The results reveal recurring patterns in which increased production and spatial limitations act as primary risk drivers, frequently associated with the underestimation of hydraulic interactions and the absence of comprehensive stability reassessments following operational changes. It is also observed that initially localized instabilities may propagate to adjacent structures, amplifying systemic risk. It is concluded that geotechnical management in mining should incorporate integrated and systemic approaches throughout the entire life cycle of the operation as an essential condition for risk mitigation and enhancement of structural resilience.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da complexidade dos empreendimentos de mineração, associado à intensificação da produção, à limitação progressiva de áreas disponíveis e ao maior rigor regulatório, tem evidenciado limitações relevantes das abordagens tradicionais de projeto geotécnico. Em geral, estruturas como barragens de rejeitos, pilhas de estéril, cavas e sistemas de drenagem são concebidas e avaliadas de forma segmentada, apesar de integrarem um mesmo sistema físico e hidráulico, no qual alterações em uma estrutura podem influenciar diretamente o comportamento das demais [1].

Essa dissociação contrasta com o comportamento real dessas estruturas, que compartilham campos de tensões, trajetórias de fluxo e zonas de influência que evoluem ao longo do tempo. Como consequência, alterações em uma estrutura podem induzir respostas significativas em outras, configurando mecanismos de instabilidade progressiva que não são capturados por análises isoladas.

Eventos recentes têm demonstrado que critérios clássicos baseados exclusivamente em fatores de segurança determinísticos são insuficientes para representar a complexidade desses sistemas. Embora avanços regulatórios tenham incorporado conceitos de gestão de risco e avaliação ao longo do ciclo de vida, a análise ainda permanece predominantemente centrada em estruturas individuais, com pouca ênfase nas interações geotécnicas entre sistemas coexistentes [2].

Nesse contexto, observa-se uma lacuna entre a compreensão conceitual do comportamento integrado das estruturas e sua aplicação efetiva no planejamento e na operação de empreendimentos minerários, especialmente em cenários de expansão contínua e restrição espacial.

A justificativa deste trabalho fundamenta-se na evidência de que uma parcela significativa dos riscos geotécnicos críticos não decorre de falhas conceituais nos projetos iniciais, mas da evolução não integrada das estruturas ao longo do tempo. Demandas operacionais, restrições físicas e pressões econômicas frequentemente conduzem à adoção de soluções localizadas que, embora viáveis sob uma ótica pontual, podem gerar efeitos indiretos sobre estruturas adjacentes, ampliando o potencial de transferência de risco no sistema como um todo.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar as interferências geotécnicas entre estruturas de disposição e lavra inseridas em um mesmo empreendimento minerário, a partir de estudos de caso reais. Busca-se identificar mecanismos dominantes de instabilidade, reconhecer padrões recorrentes de interferência e discutir suas implicações para a segurança global do sistema.

Importante destacar que o foco do trabalho não reside na análise isolada de eventos de falha, mas na compreensão das interferências entre estruturas como mecanismo de degradação sistêmica. Nesse sentido, os estudos de caso são utilizados como base empírica para identificação de padrões de interação, e não como objeto de análise individual.

A principal contribuição do artigo consiste na sistematização dessas interferências como categoria explícita de análise, fornecendo um enquadramento técnico voltado ao planejamento integrado e à gestão de riscos em estruturas de mineração.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada baseia-se em uma análise qualitativa e comparativa de estudos de caso representativos de interferências geotécnicas em empreendimentos minerários. Os casos foram selecionados a partir de sua relevância técnica e disponibilidade de informações documentais, incluindo relatórios técnicos, registros operacionais e dados públicos.

A seleção dos casos obedeceu a critérios explícitos de inclusão: (i) coexistência, em um mesmo empreendimento ou em empreendimentos contíguos, de duas ou mais estruturas geotécnicas, pilhas, barragens, diques, cavas ou sistemas de drenagem, com potencial de interação física ou hidráulica; (ii) existência de evolução geométrica, operacional ou hidráulica documentada ao longo do tempo; (iii) disponibilidade de fontes verificáveis que permitissem reconstruir a trajetória do evento; e (iv) representatividade do mecanismo de interferência em relação às quatro categorias analisadas. Foram excluídos eventos cuja causa se restringisse a uma única estrutura, sem interação intersistêmica identificável.

Para assegurar a rastreabilidade das inferências, cada caso foi associado a um nível de evidência, conforme a natureza das fontes utilizadas: Nível I – Estudos técnicos revisados por pares e relatórios de painéis de investigação; Nível II – comunicados e documentos oficiais de órgãos reguladores e do Ministério Público; e Nível III – registros jornalísticos e imagens de sensoriamento remoto. Ao longo da análise, os fatos documentados são apresentados de forma distinta das interpretações dos autores: afirmações fundamentadas em fontes primárias são reportadas de modo assertivo, enquanto as leituras integradas propostas neste trabalho são explicitadas por expressões como "as evidências sugerem" ou "a interpretação dos autores indica", evitando atribuir caráter factual a hipóteses de mecanismo.

Cada caso foi analisado segundo quatro eixos de interferência: (i) geométrica, (ii) hidráulica, (iii) operacional e (iv) estrutural-construtiva, permitindo a identificação dos principais mecanismos de interação entre estruturas. A análise considerou a evolução temporal dos empreendimentos, com reconstrução das mudanças geométricas, operacionais e hidráulicas ao longo do ciclo de vida das estruturas.

A partir dessa abordagem, foi realizada uma comparação sistemática entre os casos, com o objetivo de identificar padrões recorrentes de interferência, mecanismos dominantes de instabilidade e trajetórias de propagação de risco no sistema minerário.

Os estudos de caso apresentados a seguir são analisados sob a ótica das interferências geotécnicas entre estruturas, com ênfase nos mecanismos de interação e não na caracterização individual dos eventos.

2.1 Interferência Hidráulica entre Estruturas de Disposição e Contenção

O sistema integrado entre a Pilha de Estéril Permanente, seu sistema de drenagem e a Barragem do Fundão constitui um caso representativo de interferência geotécnica progressiva, no qual a interação hidráulica entre estruturas adjacentes controlou a evolução da instabilidade (Figura 1).



Figura 1 – Vista aérea da Barragem do Fundão após o rompimento [3]

De acordo com as investigações técnicas e estudos publicados sobre o evento, a contribuição contínua de fluxos provenientes dos drenos de fundo da pilha favoreceu a elevação do nível freático e a saturação progressiva da ombreira da barragem, alterando as condições de contorno originalmente previstas. As evidências disponíveis indicam que esse processo esteve associado à redução das tensões efetivas e à degradação da resistência ao cisalhamento, sendo potencialmente agravado pelos alteamentos sucessivos realizados em intervalos reduzidos, sem tempo suficiente para a dissipação das poropressões [4] [5].

Como consequência, o sistema evoluiu para uma condição crítica, culminando em ruptura associada à liquefação estática. O caso evidencia que a transferência hidráulica entre estruturas, particularmente de pilhas para barragens, pode controlar o comportamento global do sistema, configurando um mecanismo dominante de propagação de risco.

2.2 Interferência entre Estrutura de Disposição e Sistema de Contenção

O sistema formado pela pilha de co-disposição, estrutura de contenção hidráulica e infraestrutura viária associada representa um caso de interferência geotécnica sob forte restrição espacial, no qual a interação entre disposição de materiais e capacidade de contenção resultou em perda de desempenho do sistema (Figura 2).



Figura 2 – Vista aérea do sistema pilha Cachoeirinha-Dique Lisa (Mina Pau Branco) após o rompimento [6]

O deslizamento de bancos da pilha mobilizou material que atingiu diretamente o reservatório do dique (Figura 3), reduzindo sua capacidade hidráulica e induzindo extravasamento por galgamento. As evidências observadas indicam a ocorrência de um mecanismo acoplado pilha-dique, no qual a instabilidade da estrutura de disposição comprometeu diretamente a função da estrutura de contenção.



Figura 3 – Estruturas antes e após o rompimento da pilha [7], em junho de 2021 e após, em junho de 2022.

Como consequência, o fluxo gerado ultrapassou os limites operacionais e atingiu a infraestrutura a jusante, evidenciando que a perda de função hidráulica, mesmo sem ruptura estrutural, pode resultar em propagação de impactos para fora da área minerária. O caso demonstra a sensibilidade de sistemas acoplados sob restrição

espacial e a importância da compatibilização entre crescimento de pilhas e capacidade de contenção [8].

2.3 Interferência Geométrico-Hidráulica em Sistema de Lavra e Disposição

O presente caso corresponde a um empreendimento minerário analisado de forma anonimizada devido à confidencialidade operacional e contratual associada aos dados técnicos. Ainda assim, o caso foi incluído por representar, de forma particularmente clara, mecanismos de interferência geotécnica associados à incompatibilização espacial entre estruturas de lavra, disposição e contenção. Por essa razão, e diferentemente dos demais casos amparados em fontes públicas verificáveis, as relações de causa e efeito aqui descritas são apresentadas explicitamente como interpretação dos autores a partir do acervo disponível.

A análise da documentação técnica disponível indica a existência de forte interação entre estruturas de lavra superficial, disposição de estéreis, contenção de rejeitos e acessos subterrâneos, caracterizada pela proximidade entre os elementos do sistema e pela evolução progressivamente conflitante de suas geometrias operacionais.

Entre os elementos documentados, destacam-se a implantação de acessos subterrâneos em áreas adjacentes às estruturas de disposição e o desenvolvimento de frentes de lavra em proximidade direta com estruturas de contenção. Adicionalmente, observou-se o direcionamento preferencial da drenagem para o fundo da cava, favorecendo a ocorrência de surgências e a elevação dos níveis piezométricos em diferentes setores do empreendimento.

A interpretação integrada dessas evidências sugere a ocorrência de um mecanismo acoplado geométrico-hidráulico, no qual decisões de layout adotadas ao longo da evolução do empreendimento contribuíram para modificar as condições hidrogeológicas e geotécnicas originalmente previstas.

Como consequência, o sistema evoluiu para perda de viabilidade operacional, com inviabilização do retaludamento seguro, aumento do risco à estrutura adjacente, necessidade de reconfiguração geométrica parcial das estruturas de disposição e alteração da frente de lavra. O caso evidencia que decisões de *layout* não integradas podem induzir trajetórias progressivas de degradação sistêmica geotécnica e perda de desempenho hidráulico, particularmente em sistemas nos quais as condições hidrogeológicas e geomecânicas não são avaliadas de forma integrada [9].

2.4 Interferência entre Estrutura de Disposição e Meio Antrópico

Este caso representa uma interferência geotécnica entre estrutura de disposição e o meio antrópico adjacente, na qual a proximidade com áreas ocupadas ampliou significativamente as consequências da instabilidade [10].

A evolução da pilha sob regime operacional intensificado, associada a condições hidráulicas desfavoráveis e à ausência de reavaliações sistemáticas de estabilidade, resultou em um mecanismo de ruptura progressiva em massa. A combinação entre geometria elevada, heterogeneidade do material e drenagem insuficiente favoreceu a mobilização do maciço [11].

Como consequência, a instabilidade extrapolou os limites da área minerária, atingindo diretamente a comunidade e a infraestrutura associada. O caso evidencia que pilhas de disposição, mesmo em configuração a seco, podem atuar como fontes relevantes de risco sistêmico quando não consideradas de forma integrada ao entorno.



Figura 4 – Imagem aérea da Pilha Satinoco após o rompimento [12]

2.5 Interferência Hidráulica entre Sistemas Minerários e Rede Hidrográfica

Este caso representa uma interferência geotécnica e hidráulica entre estruturas minerárias distintas e o sistema hídrico regional, evidenciando a conectividade funcional entre empreendimentos vizinhos (Figura 5).



Figura 5 – Imagem aérea do extravasamento de sistema de drenagem de cava [13]

O extravasamento de sistema de drenagem de cava, operando próximo à sua capacidade sob condições hidrológicas intensas, resultou em escoamento não confinado e mobilização de grandes volumes de água e sedimentos. Esse processo caracteriza um mecanismo de sobrecarga hidráulica progressiva, no qual a função operacional da cava como reservatório entra em conflito com a segurança do sistema.

Como consequência, o fluxo atingiu estruturas operacionais adjacentes e cursos d'água a jusante, evidenciando a propagação de impactos em escala de bacia. O caso demonstra que sistemas de drenagem e contenção, mesmo quando considerados auxiliares, podem atuar como elementos críticos de transferência de risco entre estruturas, empreendimentos e o meio externo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise comparativa dos estudos de caso permitiu identificar padrões recorrentes de interferência geotécnica entre estruturas de mineração. Considerando os quatro eixos técnicos adotados — (i) geométrico, (ii) hidráulico, (iii) operacional e (iv) estrutural-construtivo, verificou-se que os mecanismos de instabilidade não atuam de forma isolada, mas resultam da interação progressiva entre diferentes componentes do sistema.

As evidências reunidas indicam que alterações operacionais, como aumento da produção, alteamentos sucessivos e modificações no layout, frequentemente induzem mudanças geométricas e hidráulicas capazes de alterar as condições originalmente previstas em projeto. Em diversos casos analisados, essas alterações favoreceram a elevação dos níveis piezométricos, modificaram os fluxos internos e

reduziram a eficiência dos sistemas de drenagem, contribuindo para a degradação progressiva das condições de estabilidade.

Embora os mecanismos específicos variem entre os casos, a comparação evidencia que pequenas alterações localizadas podem produzir respostas em estruturas adjacentes, reforçando o caráter interdependente dos sistemas minerários. Nesse contexto, os resultados sugerem que a estabilidade global depende não apenas do desempenho individual de cada estrutura, mas também da evolução das interações estabelecidas entre elas ao longo do tempo.

3.1 Padrões Recorrentes Identificados

A análise comparativa dos casos evidencia a recorrência de quatro padrões principais:

- Produção como vetor primário de risco: O aumento da taxa de disposição e alteamento atua como força dominante, reduzindo o tempo geotécnico disponível para dissipação de poropressões, acomodação estrutural e adaptação dos sistemas de drenagem [14].
- Subestimação das interferências hidráulicas: A transferência de fluxos entre estruturas (pilha → barragem, pilha → dique, cava → rio) e a perda progressiva de capacidade hidráulica são fatores sistematicamente subavaliados, apesar de seu papel central na redução das tensões efetivas.
- Ausência de reavaliações globais de estabilidade: Mudanças operacionais relevantes ocorrem sem revisões integradas do sistema, mantendo-se análises compartimentalizadas que não capturam o comportamento acoplado das estruturas.
- Transferência progressiva de risco: A instabilidade raramente permanece confinada à estrutura de origem, sendo transferida ao longo do sistema (pilha → barragem → cava → meio externo), um processo de propagação de risco.

A Tabela 1 apresenta a síntese comparativa das interferências identificadas, permitindo a visualização dos mecanismos dominantes e das trajetórias de transferência de risco entre estruturas.

Tabela 1 – Interferências encontradas em cada caso estudado

Caso Analisado	Interferência Geométrica	Interferência Hidráulica	Interferência Operacional	Interferência Estrutural	Mecanismo Dominante	Efeito Geotécnico Principal	Padrão De Transferência
Caso 1: Disposição, Drenagem e Contenção (Nível I)	Proximidade pilha–barragem e modificação de berma	Drenagem da pilha induzindo saturação da ombreira	Alteamento acelerado sem tempo geotécnico	Inserção de galeria em zona crítica	Saturação progressiva da fundação	Elevação de poropressões e perda de resistência	Pilha → Barragem
Caso 2: Disposição e Contenção Hidráulica (Nível III)	Expansão da pilha sobre área do reservatório	Redução da capacidade hidráulica do dique	Crescimento sem redimensionamento de drenagem	Fundação heterogênea não tratada	Sobrecarga hidráulica com aporte sólido	Galgamento e perda de função hidráulica	Pilha → Dique de Contenção
Caso 3: Lavra, Disposição e Contenção (Acesso Restrito)	Interferência direta entre cava, pilha e contenção	Concentração de fluxo no fundo da cava	Layout condicionado à produção	Taludes incompatíveis com litologia	Acoplamento geométrico–hidráulico	Instabilidade progressiva e inviabilização do sistema	Pilha → Cava → Barragem
Caso 4: Disposição Próxima a Área Ocupada (Nível II)	Elevada altura e proximidade com área ocupada	Condições de drenagem desfavoráveis	Intensificação da disposição	Estrutura subavaliada como crítica	Ruptura progressiva em massa	Mobilização do maciço e impacto externo	Pilha → Área Habitada
Caso 5: Sistemas Minerários e Rede Hidrográfica (Nível III)	Alta densidade e proximidade entre estruturas	Extravasamento e conectividade hídrica regional	Operação sob restrição espacial	Sistemas de drenagem críticos	Sobrecarga hidráulica em escala de bacia	Escoamento não confinado e propagação regional	Sistema → Hidrografia Regional

A leitura integrada da matriz comparativa evidencia que, independentemente do tipo de estrutura ou método de disposição, os eventos analisados compartilham um conjunto limitado de mecanismos recorrentes de degradação sistêmica.

Verifica-se que a interferência hidráulica se mostrou como um dos principais mecanismos de controle da estabilidade nos casos analisados, enquanto a interferência operacional atua como principal gatilho de instabilização. Em todos os casos, a perda de desempenho está associada à elevação não prevista de níveis piezométricos, ao aumento de fluxos internos e à redução da eficiência dos sistemas de drenagem.

Do ponto de vista geotécnico, isso implica que a estabilidade passa a depender fortemente do balanço hídrico global do sistema, além dos parâmetros clássicos de resistência, aspecto frequentemente não considerado de forma integrada nas análises convencionais [15].

Adicionalmente, observa-se que os sistemas analisados operam frequentemente em estado metaestável, no qual as condições de equilíbrio são mantidas sob margens reduzidas de segurança e forte dependência do regime hidráulico. Nesses cenários, pequenas perturbações, como eventos pluviométricos intensos, alterações geométricas ou incrementos de carga, são suficientes para desencadear processos de ruptura progressiva.

Outro aspecto crítico é a natureza cumulativa das interferências. As falhas não decorrem de eventos isolados, mas da superposição de modificações ao longo do tempo, o que é consistente com mecanismos de instabilidade progressiva e, em alguns casos, liquefação estática. De forma geral, observa-se uma sequência típica de evolução dos eventos, na qual gatilhos operacionais induzem alterações geométricas e hidráulicas, resultando em elevação de poropressões, perda de resistência e posterior propagação da instabilidade para estruturas adjacentes [16].

A proximidade física entre estruturas, frequentemente imposta por restrições espaciais, amplifica o acoplamento entre mecanismos, reduz a redundância do sistema e aumenta sua sensibilidade a perturbações externas. Como consequência, observa-se a ocorrência sistemática de transferência de risco entre estruturas, caracterizando cadeias de propagação que extrapolam os limites da estrutura inicialmente instabilizada.

3.2 Implicações para a Gestão de Riscos

Os resultados obtidos permitem estabelecer implicações diretas para a prática de engenharia geotécnica em mineração:

- A unidade de análise deve migrar da estrutura isolada para o sistema minerário integrado;
- Sistemas de drenagem devem ser tratados como infraestrutura crítica compartilhada;
- O tempo geotécnico (dissipação de poropressões, consolidação e adaptação hidráulica) deve ser incorporado explicitamente como variável de projeto;

- Alterações operacionais devem acionar gatilhos formais de reavaliação global de estabilidade;
- A gestão de riscos deve considerar cadeias de propagação de falha, e não apenas cenários locais.

3.3 Limitações do Estudo

O presente trabalho possui natureza qualitativa e baseia-se na análise comparativa de estudos de caso, com reconstrução de eventos a partir de dados públicos e documentação técnica disponível. A ausência de informações detalhadas de instrumentação, parâmetros geotécnicos e séries temporais limita a quantificação dos mecanismos identificados.

Adicionalmente, a simplificação inerente à categorização em eixos de interferência pode não capturar toda a complexidade dos processos físicos envolvidos, especialmente em sistemas altamente heterogêneos e dependentes de trajetória.

3.4 Perspectivas Futuras

As evidências obtidas indicam a necessidade de evolução das abordagens de análise geotécnica em mineração, com incorporação explícita de modelos capazes de representar a interação entre múltiplos fatores ao longo do tempo. Nesse contexto, destaca-se o potencial de desenvolvimento de ferramentas preditivas baseadas em análise multicritério, capazes de integrar variáveis geométricas, hidráulicas e operacionais sob condições de incerteza.

Adicionalmente, observa-se a necessidade de avanço na modelagem do balanço hídrico integrado em escala de empreendimento, considerando a conectividade entre estruturas e a variabilidade temporal associada a eventos climáticos extremos. A incorporação de conceitos da mecânica dos solos não saturados e de estados dependentes de trajetória constitui uma linha promissora para representação mais realista do comportamento desses sistemas.

Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de metodologias que permitam a definição de gatilhos operacionais baseados em indicadores de desempenho hidráulico e geotécnico, visando à transição de uma abordagem reativa para uma gestão preditiva de riscos.

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho demonstram que a estabilidade de estruturas de mineração não pode ser adequadamente avaliada de forma isolada, sendo fortemente condicionada pelas interações entre elementos do sistema minerário.

Confirmou-se que as interferências atuam de forma acoplada, com a componente hidráulica como principal mecanismo de controle da estabilidade e os fatores operacionais, sobretudo o aumento de produção sem reavaliações integradas, como gatilhos de instabilização. Operando frequentemente em estado metaestável, os sistemas analisados propagam instabilidades inicialmente localizadas ao longo de

cadeias de transferência de risco entre pilhas, barragens, cavas e estruturas adjacentes.

Conclui-se, portanto, que abordagens baseadas exclusivamente na avaliação individual das estruturas tendem a subestimar os efeitos das interferências geotécnicas entre sistemas coexistentes. A incorporação de análises integradas, considerando conjuntamente a evolução geométrica, hidráulica e operacional, bem como os mecanismos de transferência de risco, representa um avanço importante para o planejamento e a gestão geotécnica dos empreendimentos de mineração.

5. PALAVRAS-CHAVE

Interferência Geotécnica; Planejamento Integrado; Gestão de risco; Expansão de minas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AGBOOLA, O. et al. A Review on The Impact of Mining Operation: Monitoring, Assessment and Management. Results in Engineering, v. 8, p. 100181. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100181.

[2] GRANGEIA, C. et al. Mine Tailings Integrated Investigations: The Case of Rio Tailings (Panasqueira Mine, Central Portugal). Engineering Geology, v. 123, n. 4, p. 359–372. 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.10.001.

[3] G1 MINAS. Cidades afetadas por rompimento de barragem do Fundão terão verba para obras sanitárias. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/05/09/cidades-afetadas-por-rompimento-de-barragem-do-fundao-terao-verba-para-obras-sanitarias.ghtml>. Acesso em: 11 maio 2026.

[4] SADREKARIMI, A.; RIVEROS, G. A. Static Liquefaction Analysis of the Fundão Dam Failure. Geotechnical and Geological Engineering, v. 38, p. 6431–6446, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10706-020-01446-8.

[5] STARK, T. D.; LIN, J.; GIMENES, E. A. Pore-water pressure accumulation during closely spaced earthquakes: Fundão Tailings Dam. Applied Earth Science, v. 132, n. 1, p. 16–35, 2023. DOI: https://doi.org/10.1080/25726838.2022.2147682.

[6] ZUBA, F. Imagens mostram momento em que o dique de mineradora transborda em Nova Lima, na Grande BH. G1 Minas, Belo Horizonte, 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2022/01/11/imagens-flagram-momento-em-que-o-dique-de-mineradora-transborda-em-nova-lima-na-grande-bh.ghtml>. Acesso em: 11 maio 2026

[7] Google Earth (2026), Imagem Maxar Technologies.

[8] WICKLAND, B. E.; WILSON, G. W.; WIJEWICKREME, D. Hydraulic Conductivity and Consolidation Response of Mixtures of Mine Waste Rock and Tailings. Canadian

Geotechnical Journal, v. 47, n. 4, p. 472–485. 2010. DOI: https://doi.org/10.1139/T09-115.

[9] WATERHOUSE, J. Integrating Hydrogeology with Geotechnical Engineering. In: IMWA 2019 – Mine Water: Technological and Ecological Challenges. 2019. Disponível em: https://www.imwa.info/docs/imwa_2019/IMWA2019_Waterhouse_564.pdf. Acesso em: 10 jul. 2026.

[10] BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Comunicado sobre deslizamento de pilha de rejeitos na Mina Turmalina, em Minas Gerais. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/comunicado-sobre-deslizamento-de-pilha-de-rejeitos-na-mina-turmalina-em-minas-gerais>. Acesso em: 11 maio 2026.

[11] ANM/SFI/COFAM, Marina Tietz. MINERAÇÃO EM FOCO – TRATATIVAS SOBRE PILHAS DE MINERAÇÃO. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.mpf.mp.br/atuacao/ccr4/coordenacao/eventos/eventos-2025-1/oficina-tematica-201cmineracao-em-foco-dialogos-sobre-impactos-ambientais201d-1/oficina060225PGR.pdf>. Acesso em: 11 maio 2026.

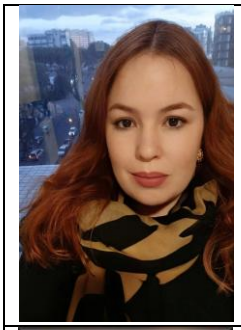
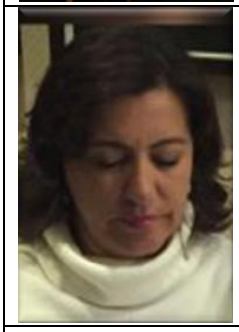
[12] MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS – MPMG. Mineradora pagará R$ 42 milhões em decorrência de danos causados por deslizamento de pilha de rejeitos em Conceição do Pará | Portal. Belo Horizonte, 2025. Disponível em: <https://www.mpmg.mp.br/portal/menu/comunicacao/noticias/mineradora-pagara-r-42-milhoes-em-decorrencia-de-danos-causados-por-deslizamento-de-pilha-de-rejeitos-em-conceicao-do-para.shtml>. Acesso em: 11 maio. 2026.

[13] COSTA, D. ANM e Defesas Civis avaliam transbordamento de água e sedimentos em mina da Vale entre Congonhas e Ouro Preto. CBN Brasil, São Paulo, 2026. Disponível em: <https://cbn.globo.com/brasil/noticia/2026/01/25/defesas-civis-avaliam-impactos-de-rompimento-de-dique-da-vale-entre-congonhas-e-ouro-preto.ghtml>. Acesso em: 11 maio 2026.

[14] WANG, F. et al. Research on the static liquefaction failure of upstream tailings dams under continuous discharge conditions. Computers and Geotechnics, v. 176, p. 106785, 24 set. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106785.

[15] CAMPBELL, R.; MACKIE, D.; ANDERSON, W. Integrated Slope Stability Assessment in a Complex Geotechnical and Hydrogeological Setting. 2013. Disponível em: https://papers.acg.uwa.edu.au/d/1308_36_Campbell/36_Campbell.pdf. Acesso em: 10 jul. 2026.

[16] OLSON, S. M.; STARK, T. D. Yield Strength Ratio and Liquefaction Analysis of Slopes and Embankments. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(727).

	**Luisa de Moura LEÃO** Engenheira Civil Geotécnica, doutora em Geotecnia (UFOP) e mestra em Saneamento e Geotecnia Ambiental (UFLA). Possui 8 anos de experiência em geotecnia aplicada à mineração, com atuação em segurança de barragens e pilhas, fechamento de minas, modelagem numérica e gestão de riscos com foco climático e normativo.
	**Marta Aparecida Sawaya MIRANDA** Geóloga/Geotécnica, mestra em Engenharia de Barragens (UFOP) e graduada em Geologia (UFMG). Possui mais de 20 anos de experiência em geotecnia de mineração, com atuação em segurança, auditoria de barragens, projetos de pilhas e descaracterização, incluindo estudos geológico-geotécnicos, hidráulicos e de liquefação. Auditora cadastrada na FEAM e ANM.
	**Lúcio Miranda CAMÊLO** Engenheiro de Minas (UFMG), M.Eng. em Engenharia Geotécnica (PUC Minas), especialista em barragens de rejeitos e membro da CBRR. Possui 13 anos de experiência em consultoria mineral, com atuação em planejamento de lavra, projetos geotécnicos, estudos de dambreak/stackbreak e estudos ambientais.
	**Marconi Bicalho CESCO** Engenheiro de Minas (UFMG), M.Eng. em Engenharia Geotécnica (PUC Minas) e mestrando em Engenharia Mineral (UFOP). Possui 13 anos de experiência em mineração, com atuação em gestão e operação de mina, planejamento de lavra e projetos de mineração e geotecnia.
	**Caio Araújo Borges Castro** Graduando em Engenharia de Minas (UFMG). Atua no apoio a estudos geotécnicos, análise de dados e elaboração de materiais técnicos, com foco em projetos geotécnicos.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

INTERPRETAÇÃO INTEGRADA DO COMPORTAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITOS A PARTIR DE REGISTROS DE MONITORAMENTO: APLICAÇÃO DO DRIFT FRAMEWORK

Lívia VERSIANI
Engenheira de Produção - PUC Minas

RESUMO

A interpretação do comportamento de barragens de rejeitos permanece como um dos principais desafios da gestão da segurança dessas estruturas. Embora os sistemas de monitoramento gerem grande volume de dados, registros geotécnicos, aspectos operacionais e características geológico-geotécnicas da fundação são, em geral, avaliados de forma independente, dificultando a compreensão integrada do comportamento da barragem e o suporte à tomada de decisão. Neste contexto, este trabalho aplica o método **DRIFT Framework (Dam Reliability Integration Framework and Trends)** a uma barragem de rejeitos localizada no sudeste do estado do Pará, para integrar registros de deslocamentos, piezometria, vazão de drenagem, vibrações e dados da fundação por meio de conceitos de engenharia de confiabilidade. Os resultados mostraram que os deslocamentos acompanharam a evolução das atividades de desmonte, apresentando atraso aproximado de seis dias em relação aos registros de vibração. A interpretação integrada evidenciou que os processos operacionais, geotécnicos e hidráulicos evoluíram em diferentes escalas de tempo, com manutenção da poro-pressão por até 30 dias, mesmo sob variações da vazão de drenagem. A projeção dos deslocamentos em relação ao critério de recalque admissível permitiu estimar o horizonte de desempenho da barragem, apoiando o monitoramento e o planejamento de intervenções. A abordagem amplia a capacidade de interpretar o comportamento de barragens por meio da integração estruturada de diferentes fontes de informação, sendo escalável para outras estruturas geotécnicas monitoradas e contribuindo para transformar séries históricas de monitoramento em suporte técnico às avaliações de segurança e decisões de engenharia.

ABSTRACT

Reliable interpretation of tailings dam behavior is fundamental for effective dam safety management. However, although modern monitoring systems generate large volumes of information, geotechnical monitoring records, operational data, and geological-geotechnical foundation conditions are commonly evaluated independently, limiting the integrated understanding of dam behavior and engineering decision-making. To address this challenge, this study applies the DRIFT Framework (Dam Reliability Integration Framework and Trends) to a tailings dam located in southeastern Pará State, Brazil. The framework integrates displacement, piezometric, drainage flow, vibration, and foundation investigation data through reliability engineering concepts to support the interpretation of dam behavior over time. Integrated interpretation of the monitoring records revealed that displacement evolution followed blasting activities, with an average delay of approximately six days relative to vibration records. The analysis also showed that operational, geotechnical, and hydraulic processes evolved over different time scales, with pore-water pressure remaining elevated for up to 30 days despite variations in drainage flow. In addition, displacement projections relative to the adopted allowable settlement criterion provided an estimate of the dam performance horizon, supporting monitoring activities and engineering intervention planning.The proposed analytical framework improves the interpretation of tailings dam behavior by systematically integrating multiple monitoring datasets into a unified engineering assessment. Its methodology is scalable to other monitored geotechnical structures and provides a structured approach for converting historical monitoring records into actionable engineering information to support dam safety assessments and engineering decision-making.

1. INTRODUÇÃO

Barragens de rejeitos estão entre os ativos geotécnicos de maior criticidade da engenharia devido às elevadas consequências potenciais associadas a eventuais falhas. Além dos impactos sobre a segurança das pessoas, essas estruturas podem provocar degradação ambiental, perdas econômicas expressivas e comprometer a continuidade operacional dos empreendimentos, exigindo sistemas robustos de monitoramento, avaliação de desempenho e gerenciamento de riscos [1] [2]. Os rompimentos das barragens de Fundão, em 2015, e Brumadinho, em 2019, reforçaram a necessidade de aperfeiçoar continuamente as práticas de monitoramento, interpretação técnica e tomada de decisão voltadas à segurança dessas estruturas [3].

A segurança de uma barragem depende da compreensão de seu comportamento ao longo do tempo. Essa resposta resulta da interação entre processos geotécnicos, hidráulicos, geológicos e operacionais que atuam simultaneamente durante toda a vida útil da estrutura [4] [5]. Deslocamentos superficiais, pressões neutras, vazões de drenagem, níveis d'água, vibrações decorrentes de desmontes com explosivos e características da fundação representam diferentes informações sobre esse comportamento. Entretanto, quando esses registros são avaliados de forma isolada, relações importantes entre os fenômenos monitorados podem tornar-se menos evidentes, dificultando a compreensão do comportamento global da barragem [1][6][7].

Nesse contexto, a engenharia de confiabilidade oferece uma abordagem consistente para incorporar as incertezas inerentes aos materiais geotécnicos e aos registros de monitoramento, contribuindo para a interpretação da evolução do comportamento da estrutura ao longo do tempo [8][9]. Associada à análise integrada de diferentes registros de monitoramento, essa abordagem amplia o suporte técnico às avaliações de desempenho e às decisões relacionadas ao gerenciamento da segurança de barragens [10].

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo interpretar a evolução do comportamento de uma barragem de rejeitos por meio da análise integrada de registros de monitoramento geotécnico, informações operacionais e características da fundação, utilizando o DRIFT Framework (*Dam Reliability Integration Framework and Trends*) como metodologia de apoio à interpretação dos dados. O detalhamento metodológico do DRIFT Framework foi submetido para publicação científica na revista *Soils and Rocks*, sendo apresentada neste artigo sua aplicação em um estudo de caso desenvolvido em uma barragem localizada no sudeste do Pará.

A abordagem adotada organiza e interpreta, de forma integrada, registros de deslocamentos, pressões neutras, vazão de drenagem, nível do reservatório, vibração associada aos desmontes com explosivos e características geológico-geotécnicas da fundação, permitindo compreender a evolução conjunta dessas informações ao longo do período monitorado. A aplicação da metodologia em um caso real busca fornecer uma abordagem estruturada para apoiar a interpretação integrada dos registros de monitoramento e subsidiar decisões relacionadas ao gerenciamento da segurança de barragens.

2. MATERIAIS E MÉTODOSA metodologia adotada neste estudo foi estruturada para integrar informações geotécnicas, hidráulicas e operacionais, permitindo interpretar a evolução do comportamento de uma barragem de rejeitos ao longo do período monitorado. A análise combinou registros obtidos pelos sistemas de instrumentação da barragem, informações operacionais de mina e dados de investigação geotécnica da fundação, organizados em uma abordagem baseada em engenharia de confiabilidade.

2.1 Descrição do ativo

O estudo foi conduzido em uma barragem de contenção de sedimentos localizada na região sudeste do estado do Pará, Brasil. A estrutura foi projetada em 2015 e teve sua construção concluída em 2018, sendo implantada sobre fundação composta por solos residuais e coluvionares, conforme documentação de projeto executivo e levantamento *as built* [11]. A barragem foi selecionada para este estudo em razão da disponibilidade de um histórico contínuo de monitoramento, associado à existência de investigações geológico-geotécnicas detalhadas da fundação, permitindo integrar diferentes fontes de informação na interpretação do comportamento da estrutura.

A barragem é constituída por um maciço de terra compactada com altura máxima de 34,13 m, comprimento aproximado de 373 m e largura de crista variando entre 7,5 m e 8,5 m. O talude de montante apresenta inclinação aproximada de 1,8H:1V, protegido por enrocamento tipo *riprap*, enquanto o talude de jusante possui inclinação de aproximadamente 2,0H:1V, com bermas intermediárias implantadas a cada 10 m de desnível e revestimento vegetal para controle de processos erosivos [11].

A característica geológico-geotécnica de maior relevância para este estudo corresponde à presença de camadas de solo coluvionar na ombreira direita da barragem, particularmente na Seção B. Durante a fase construtiva foram identificadas surgências nessa região, motivando a implantação de uma trincheira drenante a jusante do maciço para auxiliar no controle do fluxo subterrâneo. Essas condições tornam esse setor particularmente relevante para a interpretação do comportamento da estrutura, uma vez que características da fundação podem influenciar sua resposta deformacional e hidráulica ao longo do tempo. A Figura 1 apresenta o perfil longitudinal da barragem, destacando a geometria do maciço e as principais características geológico-geotécnicas da fundação consideradas na análise desenvolvida neste estudo [11].

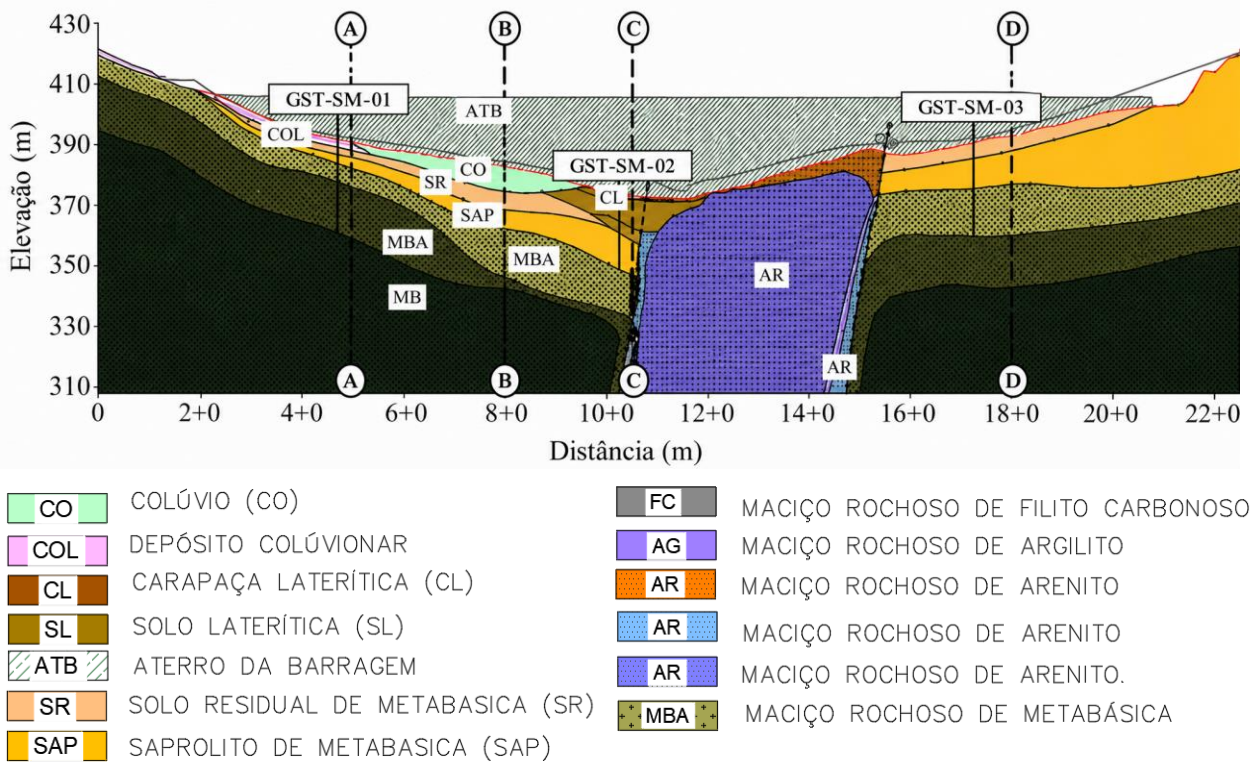


Figura 1 – Perfil longitudinal da barragem ao longo do eixo principal, destacando as condições de fundação e a geometria do maciço. Fonte: Geoestável (2021).

O sistema de drenagem interna é composto por filtro vertical, tapete drenante do tipo sanduíche implantado sobre a fundação e dreno de pé constituído por materiais de transição e enrocamento. Esses elementos foram projetados para favorecer o controle da percolação e a dissipação das pressões neutras, desempenhando papel importante no comportamento hidráulico da estrutura [11].

O monitoramento geotécnico da barragem é realizado por meio de um sistema de instrumentação automatizado composto por 17 piezômetros, 35 prismas convencionais, 18 prismas adesivos, quatro marcos superficiais, uma régua de nível e um medidor de vazão do tipo calha Parshall, permitindo o acompanhamento contínuo do comportamento da estrutura. Os dados são adquiridos automaticamente, com leituras realizadas a cada dois minutos e transmissão para o sistema de monitoramento a cada cinco minutos.

Para as análises desenvolvidas neste trabalho foram selecionados os prismas P03 e P07, localizados na ombreira direita da barragem, e os piezômetros PZ04 e PZ06, posicionados na região central do maciço e da fundação. Esses instrumentos foram escolhidos por representarem os setores de maior interesse para a investigação, permitindo avaliar de forma integrada a evolução dos deslocamentos superficiais, das pressões neutras e sua relação com as características geológico-geotécnicas da fundação ao longo do período monitorado. A distribuição espacial dos instrumentos considerados neste estudo é apresentada na Figura 2 [11].

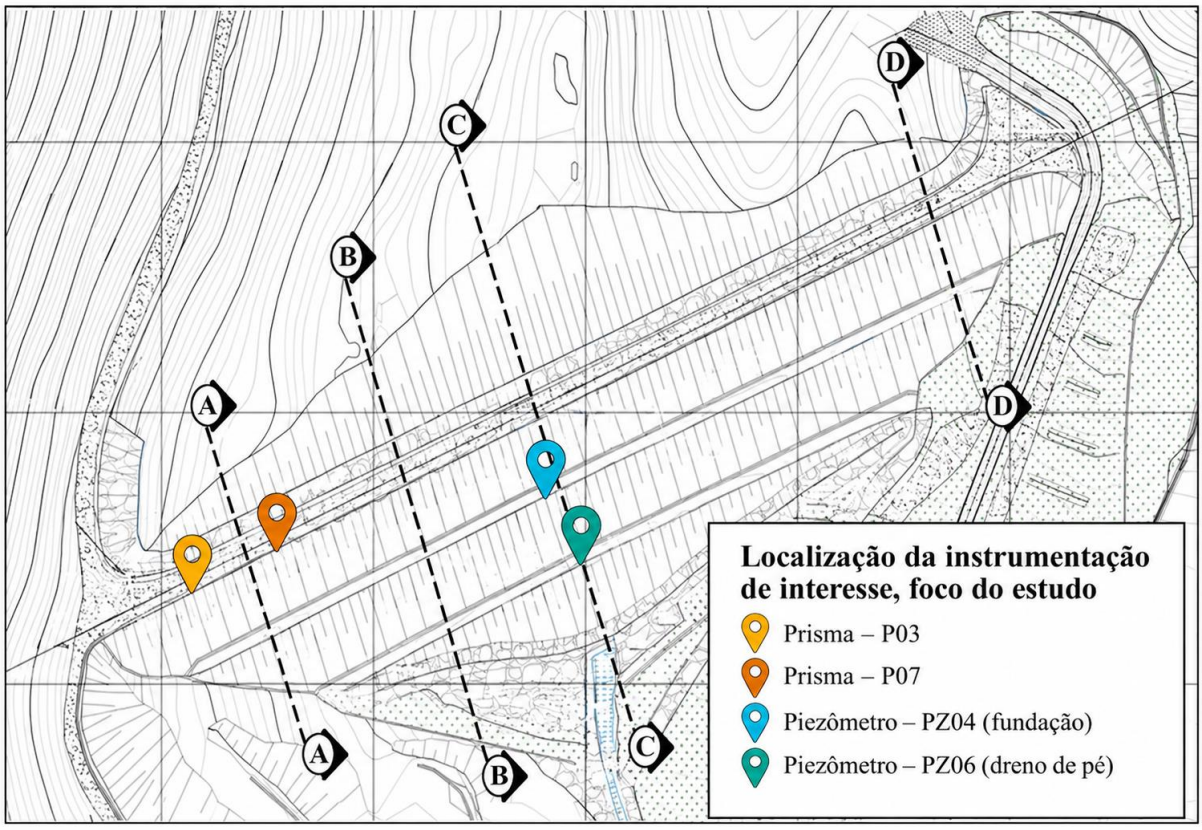


Figura 2 – Distribuição espacial dos instrumentos de monitoramento geotécnico utilizados no estudo. Fonte: Geoestável (2021).

Adicionalmente, em função da ausência de valores de recalque admissível definidos em projeto ou monitorados após a construção, foram adotados critérios de referência compatíveis com barragens fundadas em solos residuais e coluvionares, conforme recomendações da literatura geotécnica [12].

2.2 Metodologia

A metodologia adotada neste estudo foi desenvolvida para interpretar a evolução do comportamento da barragem por meio da análise integrada de registros de monitoramento geotécnico, hidráulico e operacional. Para isso, foram combinadas técnicas de engenharia de confiabilidade com informações provenientes dos sistemas de monitoramento da barragem e das investigações geológico-geotécnicas da fundação, permitindo analisar o comportamento da estrutura sob diferentes perspectivas e em um mesmo referencial temporal [8][9].

A análise considerou registros de deslocamentos obtidos por prismas topográficos, pressões neutras medidas por piezômetros, vazão de drenagem, nível do reservatório, vibração associada aos desmontes com explosivos e as características geológico-geotécnicas da fundação, obtidas a partir do projeto executivo, levantamentos *as built* e investigações de campo. A seleção desses registros teve como base sua relevância para a compreensão dos mecanismos que influenciam o comportamento da barragem ao longo do período monitorado, permitindo integrar diferentes perspectivas de análise em uma mesma avaliação da resposta estrutural [1][6][7].

A interpretação integrada dos registros foi conduzida por meio do DRIFT Framework (*Dam Reliability Integration Framework and Trends*), desenvolvido para organizar diferentes fontes de informação em uma única sequência de análise baseada em engenharia de confiabilidade. O fluxo metodológico empregado neste estudo é apresentado na Figura 3.

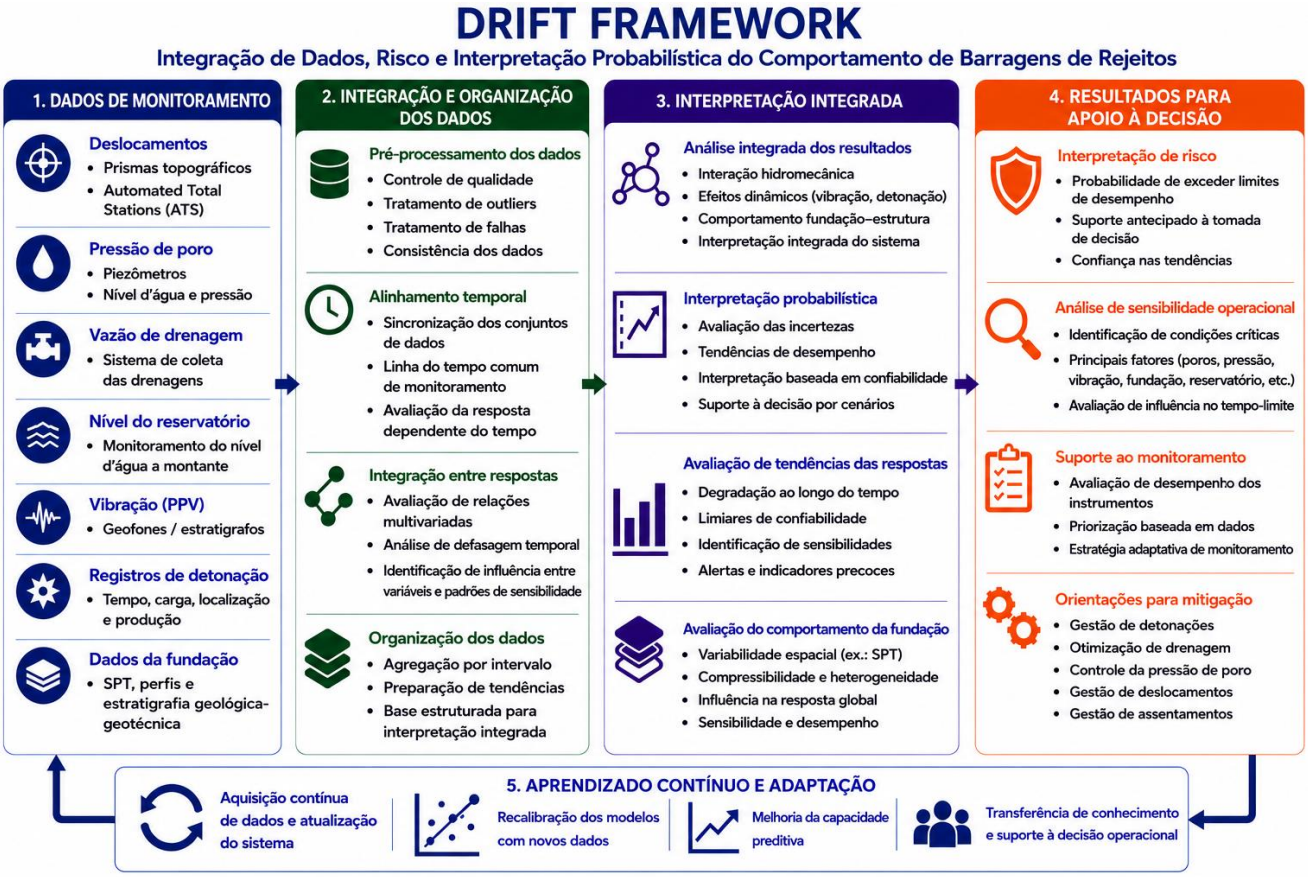


Figura 3 – Fluxo metodológico do DRIFT Framework utilizado para interpretação integrada dos registros de monitoramento considerados neste estudo. Fonte: Elaboração própria.

O detalhamento metodológico do DRIFT Framework foi submetido para publicação científica na revista *Soils and Rocks*. Neste artigo são apresentados apenas os procedimentos necessários para compreensão da aplicação desenvolvida neste estudo de caso.

O DRIFT Framework foi estruturado em cinco etapas sequenciais, que conduzem a interpretação do comportamento da barragem desde a organização dos registros históricos até a projeção do horizonte de desempenho da estrutura: **(i)** organização e tratamento dos registros históricos de monitoramento; **(ii)** caracterização do comportamento de cada conjunto de registros por meio de análises de confiabilidade; **(iii)** integração e interpretação dos resultados das análises de confiabilidade; **(iv)** avaliação das relações entre o comportamento geotécnico, hidráulico, operacional e as características da fundação; e **(v)** projeção da evolução dos deslocamentos em relação ao critério de engenharia adotado.

Inicialmente, os registros históricos foram avaliados quanto à consistência, organização cronológica e disponibilidade das informações para cada instrumento monitorado. Em seguida, cada conjunto de registros foi analisado individualmente por meio de Life Data Analysis (LDA), utilizando modelos de confiabilidade para

caracterizar sua evolução ao longo do período monitorado. Essa etapa permitiu identificar mudanças de comportamento, estimar horizontes de confiabilidade e estabelecer uma base comum para comparação entre diferentes registros de monitoramento [8][9].

Na etapa seguinte, os resultados das análises de confiabilidade foram interpretados de forma integrada, considerando conjuntamente os deslocamentos, as pressões neutras, a vazão de drenagem, o nível do reservatório, a vibração associada aos desmontes com explosivos e as características geológico-geotécnicas da fundação. Essa análise buscou identificar relações entre os diferentes registros de monitoramento e compreender como alterações observadas em um parâmetro poderiam estar associadas ao comportamento dos demais, contribuindo para uma interpretação mais abrangente do comportamento da barragem [10].

Por fim, foram realizadas simulações de Monte Carlo para representar a variabilidade observada nos registros de monitoramento e estimar a evolução dos deslocamentos em relação ao critério de engenharia adotado para avaliação do horizonte de desempenho da estrutura. As simulações foram utilizadas como ferramenta de apoio à interpretação dos resultados, permitindo avaliar diferentes cenários de evolução do comportamento da barragem e seus respectivos horizontes de desempenho [13].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação da metodologia permitiu analisar a evolução do comportamento da barragem sob diferentes perspectivas, considerando conjuntamente registros geotécnicos, hidráulicos, operacionais e características da fundação. Os resultados são apresentados em uma sequência lógica de interpretação, na qual cada etapa complementa a anterior e contribui para a compreensão do comportamento global da estrutura.

3.1 Evolução do comportamento da barragem

Os deslocamentos superficiais foram utilizados como ponto de partida para a interpretação do comportamento da barragem, por representarem um dos principais parâmetros de acompanhamento das deformações ao longo do período monitorado [1][6].

Conforme apresentado na Figura 4, os maiores deslocamentos ocorreram na ombreira direita da barragem. Por esse motivo, os prismas P03 e P07 foram selecionados para as análises seguintes, por estarem localizados nesse setor e sobre a região da fundação caracterizada pela presença de solo coluvionar.

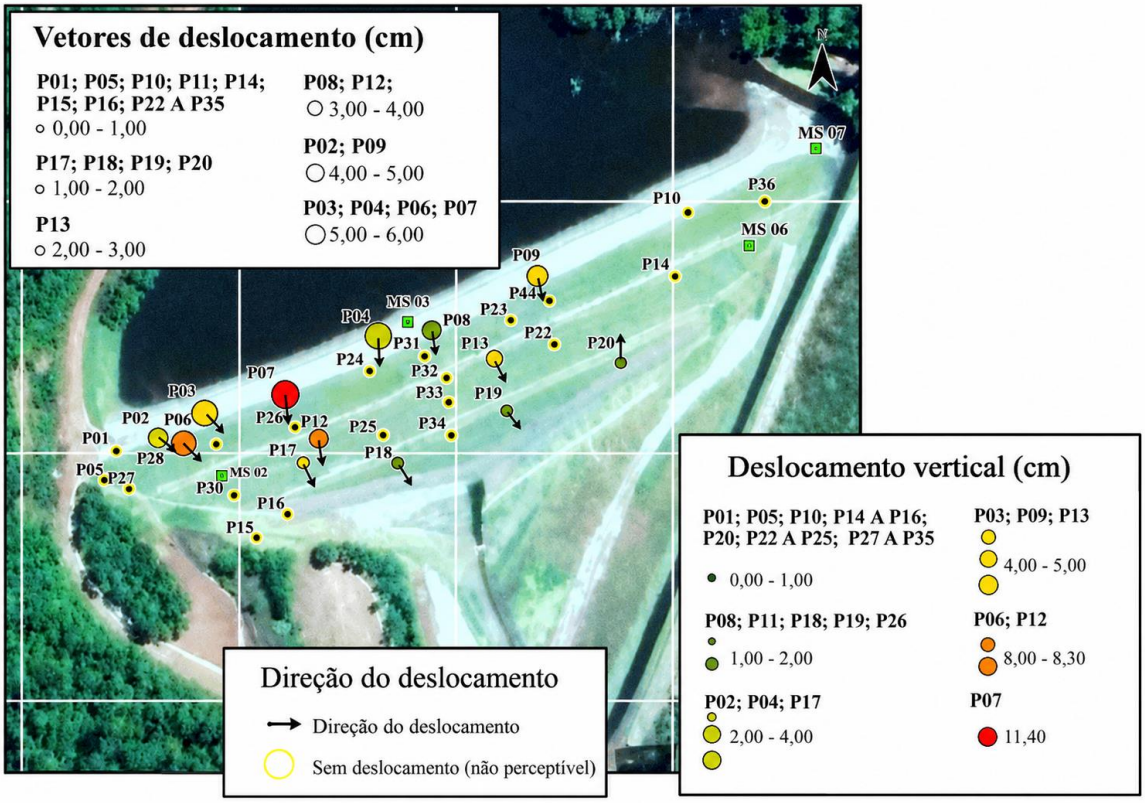


Figura 4 – Vetores de deslocamento superficial obtidos por monitoramento topográfico, indicando a magnitude e a direção dos deslocamentos registrados na barragem. Fonte: Geoestável (2022).

A evolução dos deslocamentos nos prismas P03 e P07 é apresentada na Figura 5, por meio das curvas de confiabilidade obtidas para cada ano de monitoramento.

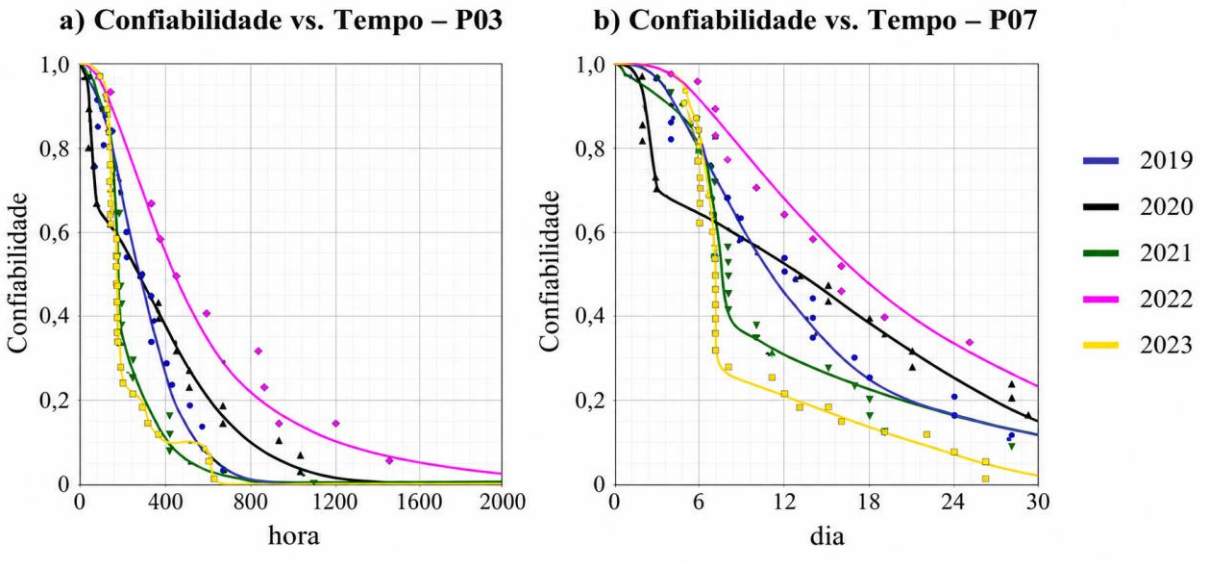


Figura 5 – Evolução da confiabilidade dos deslocamentos monitorados nos prismas P03 (a) e P07 (b) entre 2019 e 2023. Fonte: Elaboração própria.

As curvas de confiabilidade reproduziram a evolução dos principais acontecimentos registrados durante o período monitorado. Os resultados de 2019 representam a condição inicial observada na barragem. Em 2020, ambos os prismas passaram a

apresentar uma mudança em relação ao padrão registrado no ano anterior, coincidindo com a abertura da cava e a intensificação das atividades de mineração nas proximidades da estrutura. Esse comportamento permaneceu em 2021. Em 2022, observou-se melhora da confiabilidade, evidenciada pela permanência das curvas em níveis mais elevados durante intervalos mais longos. Em 2023, as curvas voltaram a apresentar redução da confiabilidade, indicando uma nova alteração no comportamento dos deslocamentos.

As análises de confiabilidade permitiram identificar mudanças no comportamento dos deslocamentos ao longo do período monitorado. A interpretação dessas transições foi complementada pela integração com os registros operacionais, hidráulicos e as características geológico-geotécnicas da fundação.

3.2 Evolução dos deslocamentos em relação às atividades de desmonte

Durante todo o período avaliado, a barragem permaneceu sob influência das atividades de mineração desenvolvidas em seu entorno, incluindo a abertura da cava e os desmontes com explosivos. Em ambientes de mineração, as vibrações geradas por detonações podem propagar-se além da área de escavação e influenciar a resposta de estruturas geotécnicas, devendo ser consideradas na interpretação do comportamento monitorado [14].

A localização relativa da barragem em relação às frentes de lavra e às atividades de desmonte é apresentada na Figura 6.

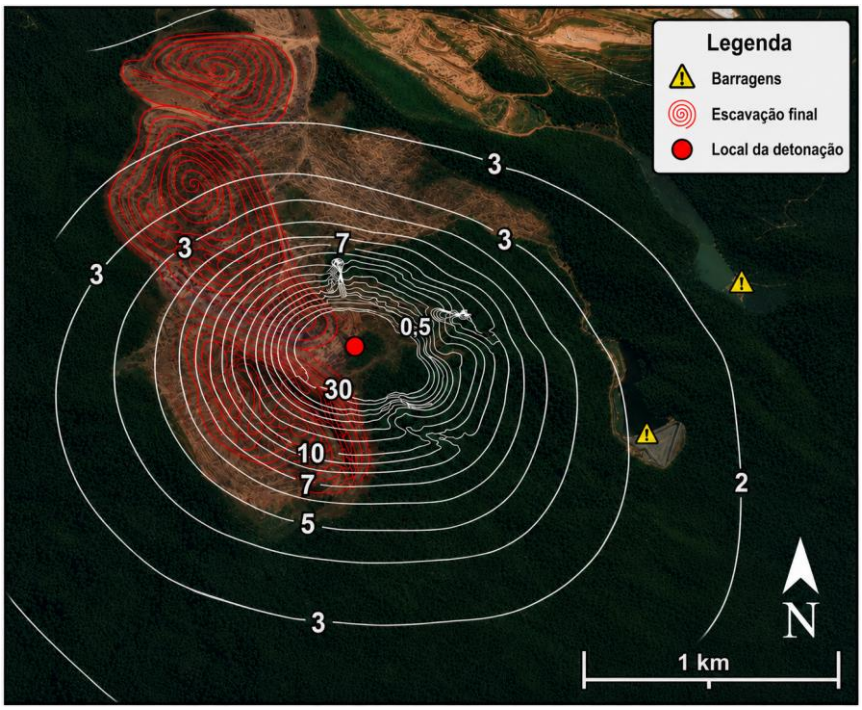


Figura 6 – Localização da barragem em relação às frentes de desmonte e aos contornos de atenuação da vibração. Fonte: Registros operacionais e dados internos de monitoramento (2017–2023).

Para avaliar a evolução dos deslocamentos em relação às atividades operacionais, foram integrados os registros de detonação, vibração e deslocamentos dos prismas P03 e P07, utilizando a mesma referência temporal. O resultado dessa integração é apresentado na Figura 7.

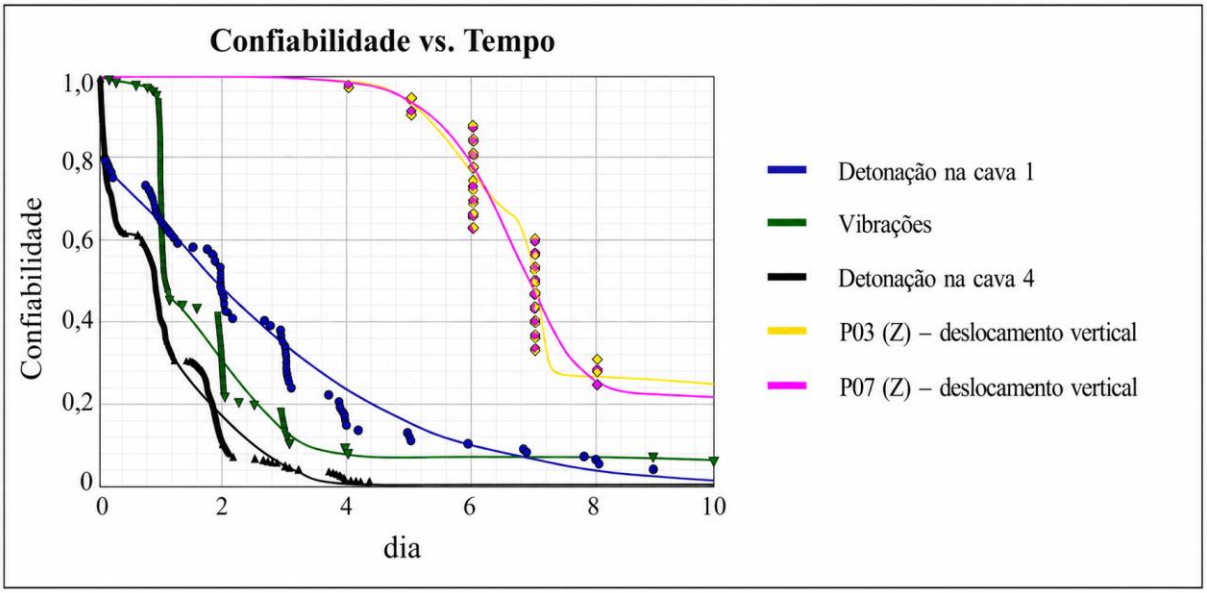


Figura 7 – Evolução integrada dos registros de detonação, vibração e deslocamentos monitorados. Fonte: Elaboração própria.

Os registros mostram que as alterações nos deslocamentos não ocorreram simultaneamente às detonações. Em ambos os prismas, as mudanças passaram a ser registradas aproximadamente seis dias após os eventos de desmonte, indicando um intervalo entre a atividade operacional e a resposta monitorada na barragem.

Esse intervalo é compatível com a resposta diferida observada em processos geotécnicos, nos quais a dissipação de energia, a redistribuição de tensões e a reacomodação do maciço ocorrem de forma gradual [2][5][15].

Observou-se comportamento semelhante entre os prismas P03 e P07, diferenciando-se principalmente pela defasagem temporal das respostas. Ambos estão localizados na ombreira direita da barragem, região onde predominam materiais coluvionares na fundação, reconhecidos por apresentarem maior deformabilidade em comparação aos demais materiais identificados na estrutura [4][15].

De forma geral, períodos com maior concentração de eventos de vibração coincidiram com reduções mais acentuadas da confiabilidade dos deslocamentos. Nas curvas obtidas pelas análises de confiabilidade, esse comportamento é representado por trechos de maior inclinação, indicando maior frequência de dados registrados durante esses períodos.

3.3 Evolução das condições hidráulicas

As interações hidromecânicas foram avaliadas por meio dos registros integrados apresentados na Figura 8, que reúnem medições de vibração, deslocamentos, pressões neutras e vazão.

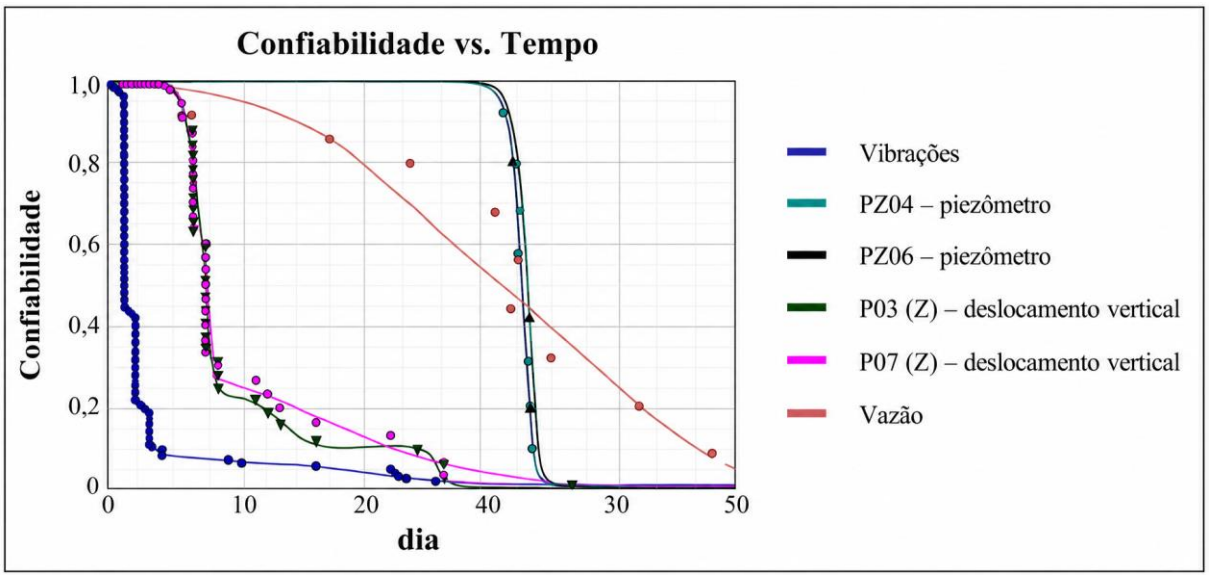


Figura 8 – Curvas de confiabilidade de vibração, deslocamento (P03 e P07), pressões neutras (PZ04 e PZ06) e vazão, destacando a interação entre respostas mecânicas e hidráulicas. Fonte: Elaboração própria.

As curvas de confiabilidade indicam correspondência entre eventos de vibração e a resposta das demais variáveis ao longo do tempo.

Adicionalmente, verifica-se que as movimentações dos prismas ocorrem aproximadamente 6 dias após os eventos de detonação, enquanto a poro-pressão permanece elevada por períodos de até 30 dias, mesmo em condições de variação de vazão. A ausência de alívio significativo de pressão nos piezômetros sugere possível restrição no rebaixamento do nível de água nos materiais da ombreira direita, influenciando a resposta da estrutura ao longo do tempo.

A hipótese considerada baseia-se no fato de que a vibração induz o rearranjo das partículas do solo, promovendo a liberação da água retida nos poros, resultando em recalque do material e transferência dessa carga para o sistema de drenagem por meio de percolação, conforme descrito na literatura clássica de mecânica dos solos [2][5][15].

No que se refere à drenagem, a curva de vazão apresenta comportamento suave, indicando variação contínua ao longo do tempo. Em contraste, os piezômetros PZ04 e PZ06 apresentam baixa variação nas leituras de pressão. Considerando que o piezômetro mede pressão e que a água é incompressível, uma tendência de redução de vazios no solo, sem dissipação imediata da água, resulta em aumento de poro-pressão. Ao longo do tempo, essa pressão tende a se dissipar gradualmente por percolação, refletindo-se em uma variação progressiva das curvas de confiabilidade [2][5].

Parte da água liberada é captada pelo sistema drenante localizado na região central da barragem, enquanto outra parcela pode aflorar na região jusante da ombreira direita, onde a presença de solo coluvionar, com maior permeabilidade, favorece a percolação. Adicionalmente, a implantação de uma trincheira drenante contribui para o direcionamento do fluxo hídrico nessa região [4][15].

Como consequência, a atividade piezométrica pode permanecer relativamente sem alteração, mesmo diante de mudanças nas condições de drenagem observadas ao longo do período monitorado [5][17][18].

Maior variabilidade foi observada nos registros de vazão que corresponde à resposta integrada dos processos hidráulicos que ocorrem no sistema barragem-fundação. Assim, as variações registradas podem refletir a influência combinada do nível do reservatório, da percolação através do maciço e da fundação, da operação do vertedouro e do sistema interno de drenagem, produzindo oscilações mais expressivas do que aquelas observadas nos registros piezométricos [19].

Informações complementares sobre o comportamento hidráulico são apresentadas na Figura 9, que compara os níveis do reservatório com os registros dos piezômetros PZ04 e PZ06 ao longo do período monitorado.

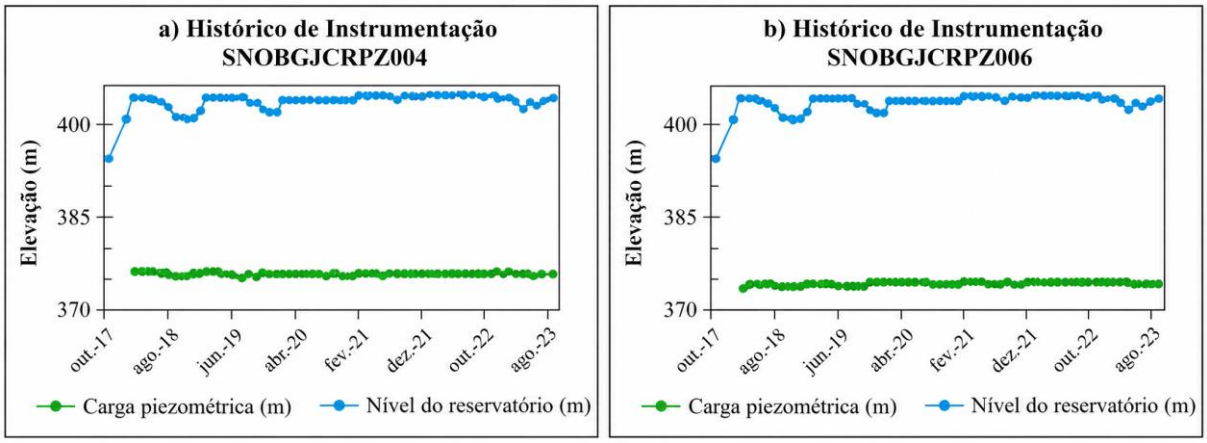


Figura 9 – Evolução dos níveis piezométricos dos piezômetros PZ04 (a) e PZ06 (b) em relação ao nível do reservatório. Fonte: Registros operacionais e dados internos de monitoramento (2017–2023).

Os níveis do reservatório apresentaram oscilações durante o período avaliado, enquanto os registros piezométricos permaneceram com variações comparativamente reduzidas. A interpretação dos sistemas de instrumentação deve considerar a evolução dos registros ao longo do tempo, e não medições isoladas. Nesse contexto, o comportamento observado na Figura 9 é coerente com os padrões identificados na Figura 8 e reforça a importância da interpretação integrada de deslocamentos, pressões neutras e vazão de drenagem [16].

3.4 Influência das condições de fundação

As condições de fundação foram avaliadas a partir da integração entre as investigações geológico-geotécnicas e os registros de monitoramento, buscando

verificar se as diferenças observadas no comportamento da barragem apresentavam correspondência com as características dos materiais de apoio da estrutura.

A localização dos furos de sondagem e das seções transversais utilizadas na caracterização da fundação é apresentada na Figura 10.

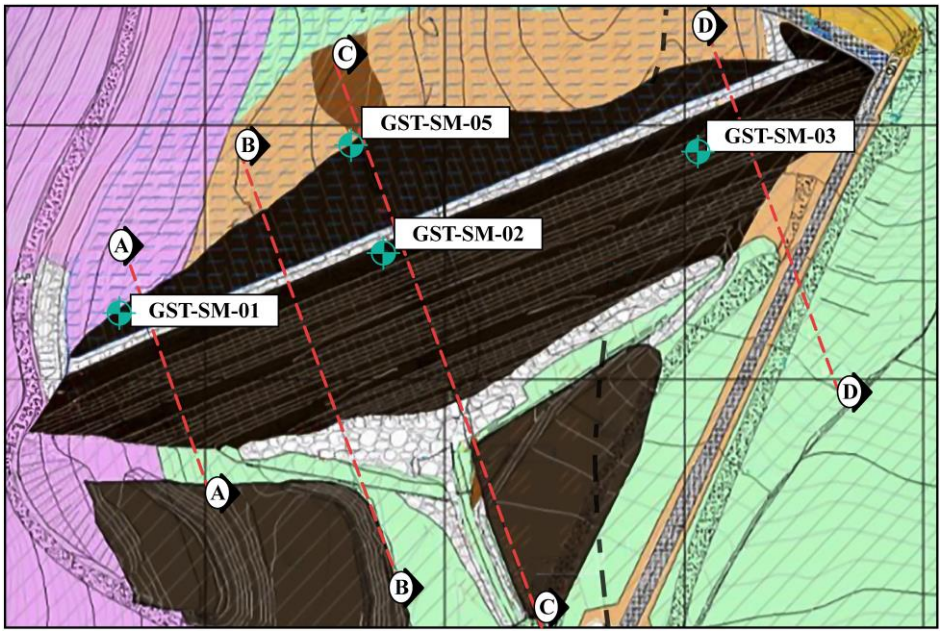


Figura 10 – Localização dos furos de sondagem e das seções transversais utilizadas na análise da fundação da barragem. Fonte: Geoestável (2023).

Os valores de NSPT obtidos nas sondagens foram analisados por meio da metodologia proposta, permitindo comparar a variabilidade das condições geotécnicas ao longo da fundação da barragem. A evolução das curvas obtidas é apresentada na Figura 11.

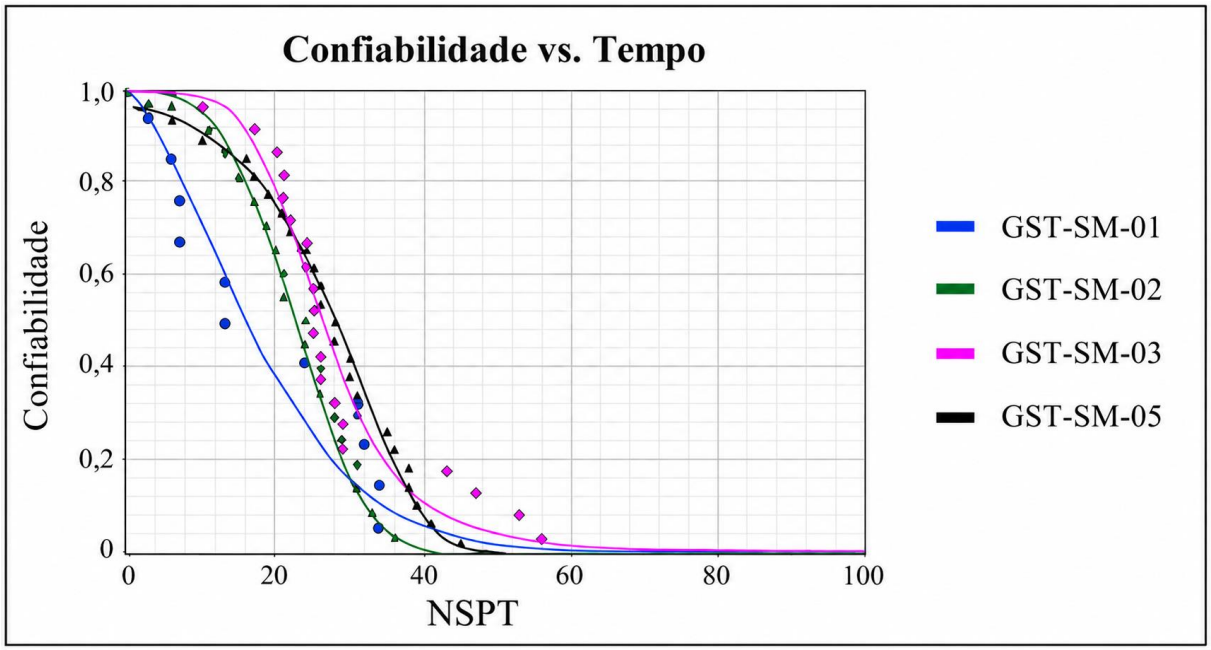


Figura 11 – Curvas de confiabilidade associadas às seções de sondagem (NSPT). Fonte: Elaboração própria.

A análise da Figura 11 permite avaliar a aplicabilidade das curvas de confiabilidade na caracterização das condições geotécnicas da fundação da barragem, estabelecendo uma relação entre o número de golpes do ensaio SPT e a resistência à penetração das camadas. Essa abordagem possibilita interpretar a variabilidade geotécnica da fundação sob uma perspectiva probabilística, considerando que cada camada apresenta propriedades distintas, como resistência, densidade e permeabilidade, que influenciam diretamente seu comportamento sob carregamento [5].

As curvas de confiabilidade foram definidas a partir da distribuição dos valores de NSPT, utilizando o número de golpes como indicador da resistência à penetração dos materiais da fundação. Nesse contexto, menores valores de confiabilidade estão associados a materiais com menor resistência, caracterizados por baixos valores de NSPT, enquanto camadas mais competentes apresentam maior confiabilidade ao longo do intervalo analisado [5].

A Figura 11 mostra o comportamento das seções de sondagem representativas da barragem, evidenciando diferenças significativas entre os perfis geotécnicos. Destaca-se o furo GST-SM-01, que apresenta menor confiabilidade em comparação às demais seções, indicando materiais com menor resistência à penetração e menor capacidade de suporte. Esse resultado é coerente com os dados de sondagem, nos quais menores valores de NSPT foram registrados, refletindo menor capacidade de suporte da fundação.

A localização dos furos de sondagem e das seções transversais, apresentada na Figura 10, permite correlacionar os resultados das análises de confiabilidade com a posição espacial na barragem. Essa integração possibilita associar diretamente as condições geotécnicas da fundação com o comportamento observado nos prismas, especialmente nas regiões onde foram registrados maiores deslocamentos, como nos pontos P03 e P07 [11].

Os resultados mostram correspondência entre as condições geotécnicas identificadas nas sondagens, os modelos de confiabilidade e a evolução dos deslocamentos monitorados. Essa integração ampliou a interpretação do comportamento da barragem, permitindo relacionar os registros de monitoramento às características da fundação sob um mesmo contexto geotécnico.

3.5 Projeção do horizonte de desempenho

Adicionalmente, a análise da confiabilidade associada às camadas da fundação contribui para a avaliação dos recalques do maciço, permitindo identificar zonas com maior potencial de deformação. Essa abordagem está alinhada com práticas da engenharia geotécnica voltadas à estimativa de recalques e à análise do desempenho de estruturas de terra [5].

A Figura 12 apresenta a projeção do atingimento do recalque admissível da barragem para os prismas P03 (gráfico a) e P07 (gráfico b), com base na evolução dos deslocamentos verticais monitorados. Como não há valor de recalque admissível definido em projeto, adotou-se, para fins de análise, o intervalo recomendado para solos residuais e coluvionares, entre 99,5 cm e 150 cm [**Silveira**], considerando-se 100 cm como referência.

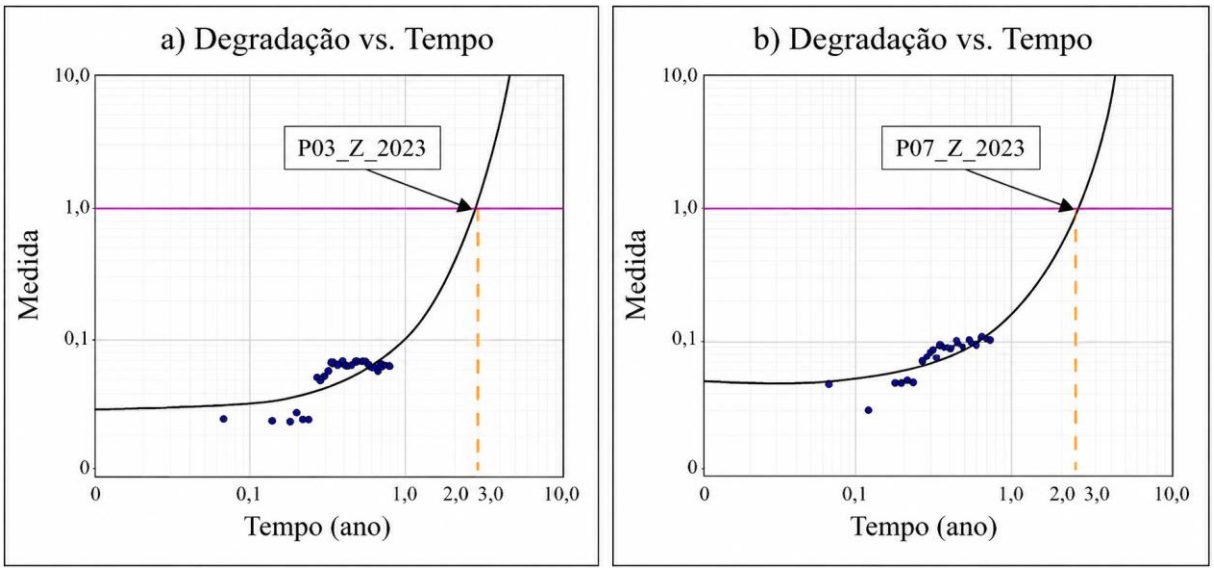


Figura 12 – Projeção probabilística do tempo de atingimento do recalque admissível para os prismas P03 (a) e P07 (b). Fonte: Elaboração própria.

A projeção considerou a variabilidade dos dados e projetar o comportamento futuro da fundação. A partir dos dados de monitoramento de janeiro a setembro de 2023, foram geradas curvas de confiabilidade que indicam o tempo associado ao atingimento do limite adotado.

Os resultados indicam que o recalque admissível poderia ser atingido próximo de 2 anos após a última medição para o prisma P03 e em aproximadamente 1,5 anos para o prisma P07, situando-se entre meados e o final de 2025. Esses resultados indicam que, mantidas as condições observadas durante o período monitorado, o horizonte projetado aproxima-se do critério de engenharia adotado para avaliação dos deslocamentos.

Embora os valores acumulados de recalque observados entre 2018 e 2023 sejam relativamente baixos — cerca de 4,5 cm para o P03 e 7 cm para o P07 — a análise probabilística indica a possibilidade de mudança no regime de comportamento ao longo do tempo. Esse resultado é consistente com o comportamento de solos, nos quais podem ocorrer transições não lineares e aceleração de deformações [12].

Dessa forma, a projeção evidencia que a avaliação baseada exclusivamente em tendências históricas pode não representar adequadamente a evolução futura dos deslocamentos. A capacidade do modelo em identificar antecipadamente possíveis mudanças de comportamento constitui um elemento relevante para a gestão da segurança.

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que o horizonte estimado para atingimento do recalque admissível é incompatível com níveis aceitáveis de risco operacional, o que forneceu subsídios técnicos para a avaliação da necessidade de

intervenção na barragem, visando mitigar a possibilidade de evolução para condições críticas.

4. DISCURSSÃO

Os resultados mostram que a interpretação integrada dos registros de monitoramento amplia a compreensão do comportamento da barragem em relação à avaliação isolada de cada instrumento. A análise conjunta dos deslocamentos, vibração, condições hidráulicas e características da fundação permitiu interpretar a evolução da estrutura sob um mesmo contexto geotécnico, em consonância com as recomendações para avaliação integrada de sistemas de monitoramento em barragens [1][16][19].

A aplicação da abordagem depende da disponibilidade de registros representativos, da qualidade do gerenciamento dos dados e da integração entre conhecimentos de geotecnia, engenharia de confiabilidade e condições operacionais da barragem. As projeções de deslocamento constituem estimativas baseadas no histórico de monitoramento e devem ser interpretadas em conjunto com a avaliação de engenharia, inspeções de campo e monitoramento contínuo, considerando as características geológicas, hidráulicas e operacionais de cada estrutura [19].

A incorporação contínua de novos registros permite atualizar e refinar as interpretações à medida que o comportamento da barragem evolui. A estrutura analítica proposta apresenta potencial de aplicação em outras estruturas geotécnicas monitoradas; entretanto, sua interpretação permanece condicionada às características específicas de cada empreendimento e à qualidade das informações disponíveis. Nesse contexto, a abordagem amplia o suporte técnico às avaliações de segurança, contribuindo para a priorização de investigações geotécnicas e para a identificação de situações que possam demandar medidas preventivas de engenharia [20].

5. CONCLUSÃO

Este estudo apresentou a aplicação do **DRIFT Framework** na interpretação integrada do comportamento de uma barragem de rejeitos, utilizando registros de monitoramento geotécnico, aspectos operacionais e informações geológico-geotécnicas da fundação. A abordagem integrou deslocamentos, vibração, pressões neutras, vazão de drenagem e características da fundação, permitindo interpretar a evolução do comportamento da estrutura sob um mesmo contexto de análise, considerando a variabilidade inerente aos registros de monitoramento.

Os resultados mostraram correspondência entre os registros operacionais, as respostas dos sistemas de monitoramento e as características geológico-geotécnicas da fundação, ampliando a compreensão do comportamento observado ao longo do período avaliado. A aplicação da engenharia de confiabilidade contribuiu para organizar e interpretar essas diferentes informações de forma integrada, fornecendo elementos adicionais para apoiar a avaliação do desempenho da barragem.

A projeção dos deslocamentos forneceu uma estimativa do horizonte de desempenho da estrutura em relação ao critério de engenharia adotado, constituindo uma ferramenta complementar para subsidiar a interpretação técnica, o planejamento das atividades de monitoramento e a avaliação de medidas preventivas, sempre em conjunto com o julgamento de engenharia, inspeções de campo e monitoramento contínuo.

Embora este estudo tenha considerado os desmontes com explosivos como variável operacional, a estrutura analítica proposta pode ser aplicada à interpretação de outros fatores que influenciem o comportamento de estruturas geotécnicas monitoradas, desde que existam registros históricos representativos e que a análise considere as características específicas de cada empreendimento.

A integração entre registros de monitoramento geotécnico, aspectos operacionais e informações da fundação amplia o suporte técnico à interpretação do comportamento de barragens, contribuindo para avaliações de desempenho mais consistentes e para decisões de engenharia fundamentadas nas condições específicas de cada estrutura.

6. PALAVRAS-CHAVE

Barragens de rejeitos; Monitoramento geotécnico; Engenharia de confiabilidade; Análise integrada; Segurança de barragens.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD (2001) – *Tailings Dams – Risk of Dangerous Occurrences: Lessons Learnt from Practical Experiences*. Bulletin 121, Paris, França.

[2] VICK, S. G. (2017) – *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers Ltd., Vancouver, Canadá.

[3] MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. (2016) – *Fundão Tailings Dam Review Panel: Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam*. Canadá.

[4] MASSAD, F. (2003) – *Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia*. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.

[5] TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. (1996) – *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, Estados Unidos.

[6] UNITED STATES SOCIETY ON DAMS – USSD (2019) – *Guidelines for Risk Analysis in Dam Safety*. Denver, Estados Unidos.

[7] ZARE, M.; NASATEGAY, F.; GOMEZ, J. A.; MOAYEDI FAR, A.; SATTARVAND, J. (2024) – *A Review of Tailings Dam Safety Monitoring Guidelines and Systems*. *Minerals*, v. 14.

[8] ANG, A. H-S.; TANG, W. H. (2007) – *Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering*. 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, Estados Unidos.

[9] MELCHERS, R. E. (1999) – *Structural Reliability Analysis and Prediction*. 2nd ed., John Wiley & Sons, Chichester, Reino Unido.

[10] FENTON, G. A.; GRIFFITHS, D. V. (2008) – *Risk Assessment in Geotechnical Engineering*. John Wiley & Sons, Hoboken, Estados Unidos.

[11] GEOESTÁVEL (2021, 2022, 2023) – *Projeto As Built – Barragens e Diques para Contenção de Sedimentos*. Relatórios Técnicos, Belo Horizonte, Brasil.

[12] SILVEIRA, J. F. A. (2006) – *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento*. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.

[13] RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D. P. (2017) – *Simulation and the Monte Carlo Method*. 3rd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, Estados Unidos.

[14] DOWDING, C. H. (1985) – *Blast Vibration Monitoring and Control*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Estados Unidos.

[15] BLIGHT, G. (2009) – *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*. CRC Press, London, Reino Unido.

[16] DUNNICLIFF, J. (1993) – *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. John Wiley & Sons, New York, Estados Unidos.

[17] LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. (1969) – *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, Estados Unidos.

[18] CRAIG, R. F. (2004) – *Craig's Soil Mechanics*. 7th ed., Spon Press, London, Reino Unido.

[19] FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G.; FOSTER, M. (2015) – *Geotechnical Engineering of Dams*. 2nd ed., CRC Press/Balkema, Leiden, Países Baixos.

[20] ASSIS, R. (2014) – *Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Ativos Físicos*. 2ª ed., Lidel, Lisboa, Portugal.



Lívia VERSIANI

Lívia Versiani é engenheira de produção (PUC Minas), com 18 anos de experiência em engenharia de confiabilidade aplicada a sistemas industriais críticos, com atuação em mineração e estruturas geotécnicas. É certificada CRP, Black Belt, possui MBA em Gestão de Projetos, especialização em Engenharia de Minas e atualmente cursa mestrado na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Sua trajetória inclui atuação em projetos de barragens, pilhas, vertedouros e cavas, com foco em análise de estabilidade, percolação, confiabilidade estrutural e aplicação de FMEA em barragens. Destaca-se pela integração entre análise de risco, modelagem probabilística e suporte à tomada de decisão em contextos operacionais complexos. Desde 2020 na Vale, liderou a estruturação da engenharia de confiabilidade na manutenção da usina de ferrosos de Carajás (PA). Atualmente, conduz o projeto Rota Prioritária de Produção, integrando mina, usina e expedição para otimização da gestão de ativos e aumento da previsibilidade operacional. É autora de publicações técnicas na área de confiabilidade, capítulo de livro em métodos computacionais aplicados à simulação de processos e desenvolvedora de patente voltada à otimização de sistemas produtivos. Sua atuação está direcionada ao desenvolvimento de modelos que conectam dados, risco e decisão, com foco na antecipação de falhas e no fortalecimento da governança de segurança em ativos críticos.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

MODELAGEM INTEGRADA DE RISCO ESTRUTURAL E ECONÔMICO PARA APOIO À DECISÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM TÚNEIS HIDRÁULICOS

Bruno NEVES
Consultor/Engenheiro Técnico-Comercial Conesul Carpi Group

Fábio IANNOTTA
Diretor Executivo - Hibbard Brasil

RESUMO

A gestão de túneis hidráulicos exige decisões que conciliem integridade estrutural e sustentabilidade econômica. Este trabalho apresenta uma modelagem integrada de avaliação de risco estrutural e econômico, baseada em parâmetros de projeto, condições geológicas, regime operacional e dados de inspeções subaquáticas com ROV e sonar. A modelagem consolida esses fatores em um índice de criticidade associado ao potencial impacto financeiro de falhas, permitindo avaliar a viabilidade e o momento adequado para implantação de programas de manutenção preventiva. A abordagem contribui para decisões de investimento mais consistentes na gestão de ativos hidráulicos.

ABSTRACT

The management of hydraulic tunnels requires decisions that balance structural integrity and economic sustainability. This work presents an integrated modeling approach for assessing structural and economic risk, based on design parameters, geological conditions, operational regime, and data from underwater inspections using ROV and sonar. Modeling consolidates these factors into a criticality index associated with the potential financial impact of failures, enabling evaluation of the feasibility and appropriate timing for implementing preventive maintenance programs. This approach contributes to more consistent investment decisions in hydraulic asset management.

1. INTRODUÇÃO

Túneis hidráulicos são estruturas críticas que compõem sistemas de adução de água, principalmente nas indústrias de geração de energia e saneamento. Esses túneis desempenham papel essencial na continuidade operacional dessas indústrias, uma vez que sua indisponibilidade pode comprometer diretamente a produção de energia, ou o abastecimento de água. Predominantemente, trata-se de estruturas escavadas em maciços rochosos, frequentemente sob condições litológicas nem sempre uniforme. Ademais, especialmente nos túneis mais antigos, é recorrente a inconsistência da documentação disponível, o que compromete a avaliação precisa de sua condição estrutural e operacional.

Nesse setor, existe um paradoxo intrigante: enquanto as barragens são submetidas a rigorosos e rotineiros protocolos de inspeção para atestar sua segurança, os túneis hidráulicos — que frequentemente pertencem ao mesmo complexo e são igualmente críticos para o sistema — muitas vezes operam "no escuro". Por estarem submersos e inviabilizarem o acesso humano durante a operação, esses túneis historicamente carecem de monitoramento contínuo. Essa lacuna no controle representa um risco significativo, dada a idade avançada de muitas dessas infraestruturas e a crescente demanda por sua funcionalidade contínua [1], [2]. O resultado é uma gestão de ativos que muitas vezes opera "às cegas". Na prática tradicional, anomalias estruturais severas só são descobertas quando ocorre uma redução visível na carga hidráulica ou na vazão da água. O problema dessa abordagem é que, quando o sintoma aparece de forma perceptível, o diagnóstico já pode ser tardio: significa que o colapso já ocorreu e o dano estrutural atingiu um estágio avançado e crítico.

Falhas estruturais culminam em interrupções operacionais não programadas (paradas forçadas) que exigem um tempo prolongado de reparo, este cenário puramente reativo desencadeia um efeito cascata devastador. Os empreendedores do sistema são atingidos por perdas financeiras maciças, entre reparos emergenciais e descontinuidade de negócios, graves desafios socioeconômicos para as populações afetadas, redução drástica na confiabilidade do sistema e danos irreparáveis à reputação das empresas envolvidas, o que incide em poucas referencias na literatura sobre incidentes com túneis no Brasil.

A deterioração dos túneis ocorre, na maioria dos casos, de forma progressiva e silenciosa, associada a fatores como condições geológicas, variações no campo de tensões do maciço, presença de minerais expansivos, processos de degradação de juntas, degradação de revestimentos, entre outros. O esvaziamento de um túnel hidráulico pode desencadear um mecanismo crítico de ruptura, a despressurização impõe um elevado gradiente hidráulico i, definido como a razão entre a diferença de carga hidráulica Δh, entre o lençol freático circundante e o interior do túnel esvaziado, e a distância de fluxo L no maciço rochoso adjacente $(i = \Delta h / L)$, gerando força por unidade de volume j iguais ao peso específico da água γw multiplicado pelo gradiente i, $(j = \gamma w \cdot i)$, que atuam na direção do fluxo em direção ao túnel e modificam o equilíbrio da tensões efetiva normal ao plano de juntas $(\sigma n' = \sigma n - \mu)$, induzindo descolamentos de blocos e colapsos, particularmente em zonas geologicamente instáveis, como exemplificado na Figura *1* , falhas, áreas mal tratadas ou de rocha de baixa qualidade[3], além de expor os revestimentos à ação do ar e acelerar sua degradação com formação de cavidades, esse modo de falha pode ser ainda mais

pronunciado em estruturas que operam há muitos anos e/ou que foram submetidas à vários ciclos de esvaziamento [1], [2], [4]. Esses mecanismos raramente se manifestam de forma evidente nas fases iniciais, evoluindo sem sinais operacionais claros até atingirem estágios avançados. Na maioria dos casos, a identificação de anomalias ocorre apenas após a redução de desempenho hidráulico, como perdas de carga ou restrições de vazão, indicando que o problema já se encontra em estágio crítico.

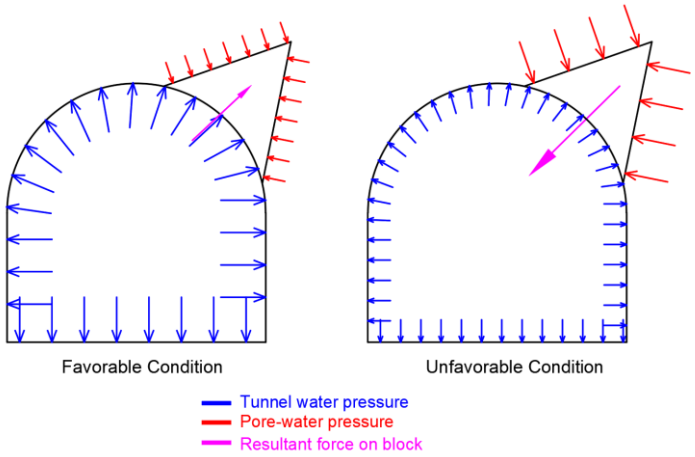


Figura 1 - Ilustração esquemática de situações favoráveis e desfavoráveis para queda de blocos durante transientes hidráulicos. Guimire et al. (2023)[5].

É notório que a gestão de túneis hidráulicos particularmente desafiadora, uma vez que a ausência de sinais precoces dificulta a adoção de ações preventivas e favorece abordagens reativas. Como consequência, intervenções passam a ocorrer em cenários de maior complexidade técnica, maiores custos e impactos operacionais significativos, incluindo paradas prolongadas do empreendimento abastecido e conseguintes prejuízos para o empreendedor além, de danos à reputação e problemas socioeconômicos.

Em um cenário industrial que exige níveis cada vez maiores de estabilidade e previsibilidade, a manutenção preventiva não pode mais ser vista apenas como um centro de custo, mas sim como um investimento estratégico, parte indispensável do negócio. A proposta é realizar uma mudança de cultura nas operações: implementar um programa que funcione como um "check-up" de saúde regular da estrutura. Essa transição do modelo reativo para o preventivo é a chave para garantir não apenas a segurança operacional, mas a sustentabilidade financeira e a resiliência a longo prazo de infraestruturas críticas.

2. LIMITAÇÕES TRADICIONAIS VS. INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

Historicamente, a avaliação da condição estrutural de túneis hidráulicos, quando ela ocorre, tem sido baseada em inspeções visuais realizadas durante paradas operacionais após drenagem da estrutura.

Esse tipo de abordagem, além de exigir planejamento complexo e altos custos associados à indisponibilidade do ativo, apresenta limitações relevantes do ponto de vista técnico e de segurança: a despressurização do túnel pode alterar as condições do maciço e do revestimento e engatilhar instabilidades interessada por falhas, diques, intrusões e alterações pelo intemperismo e causar, lá onde não estava, um problema

de grande magnitude como um colapso. Além deste conceito, a inspeção realizada por time de pessoas configura entrada em espaço confinado de potencial alta instabilidade podendo causar graves incidentes de trabalho.

Com o avanço das tecnologias de inspeção subaquática, especialmente o uso de veículos operados remotamente (ROV) equipados com sonar de imagem e perfilamento 2D/3D, tornou-se possível superar essas limitações. Essas tecnologias permitem a realização de inspeções em condição inundada, eliminando a necessidade de esvaziamento e possibilitando a aquisição de dados contínuos ao longo de todo o túnel reduzindo ao mínimo o tempo de parada e possibilitando a inspeção também fora das paradas programadas.

A geração de registros georreferenciados viabiliza a análise comparativa entre campanhas, permitindo identificar tendências de deterioração e evolução de anomalias.

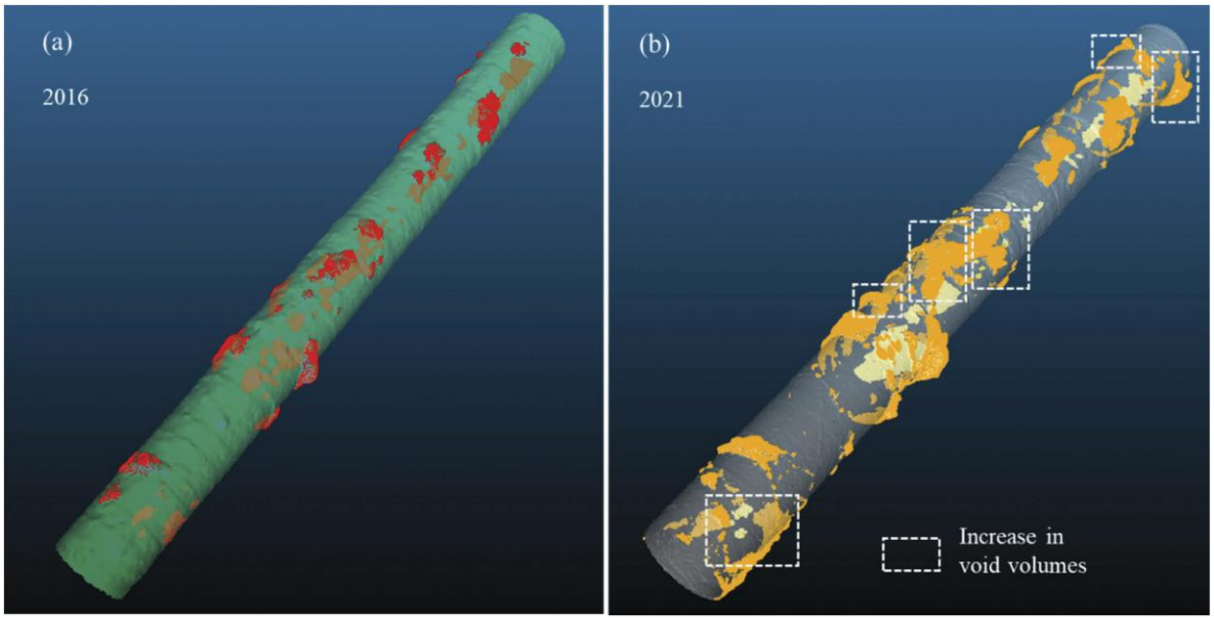


Figura 2 – Comparação de volume de vazios junto a um túnel, verificado em inspeções distintas com ROV. Adaptado de Lopez et. al. (2023)[2]

Apesar do enorme avanço entre as inspeções humanas e as técnicas subaquáticas, a simples aquisição de dados de alta qualidade não é suficiente para garantir uma gestão eficiente do ativo. Em muitos casos, as informações obtidas permanecem fragmentadas ou são analisadas de forma isolada, sem integração com dados operacionais, históricos e econômicos.

Dessa forma, torna-se necessária a adoção de uma abordagem mais estruturada e orientada à decisão, baseada na integração de dados técnicos e operacionais. A implementação de uma matriz de risco permite consolidar essas informações em um modelo coerente, capaz de classificar o ativo quanto à sua criticidade e orientar, de forma objetiva, a definição de estratégias de inspeção, monitoramento e manutenção preventiva.

3. METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM INTEGRADA

A gestão de infraestrutura de ponta exige o abandono de análises estáticas em favor de uma modelagem dinâmica de criticidade, rigorosamente customizada para as

particularidades de cada túnel hidráulico. Essa abordagem funciona como um ecossistema de inteligência que não avalia apenas a condição estrutural, mas considera a consequência econômica e social de uma eventual falha.

Para transformar os dados em inteligência administrativa, a implementação dessa metodologia ocorre em cinco módulos integrados:

a) O "Prontuário Histórico" e a Normalização de Dados

O processo se inicia pela consolidação das informações do ativo. Isso inclui a coleta de dados de projeto (vazão nominal, geometria, geologia, métodos construtivos, tipos de revestimentos, tratamentos executados e falhas na obra) e dados operacionais históricos (vazões, histórico meteorológico, disponibilidade hídrica, histórico de manobras operacionais, histórico de manutenções, variações de carga e quaisquer dados que relate a história da estrutura).

Todo esse acervo é normalizado para que critérios e formatos distintos conversem dentro de um mesmo modelo de avaliação. Essa normalização é necessária porque informações históricas podem ter sido registradas com critérios diferentes, em formatos distintos ou em contextos operacionais que já não representam integralmente a condição atual do ativo. A expectativa é que haja padronização temporal; padronização espacial; padronização de unidades e uma classificação de confiabilidade da fonte.

Tabela 1 – Classe de Confiabilidade da fonte

Classe	Confiabilidade
A	Dados instrumentados e validados
B	Dados documentais consistentes
C	Relatos operacionais
D	Inferência técnica
E	Dados incompletos

Caso o ativo não possua histórico de longo prazo, aplica-se a engenharia reversa sobre as condições recentes para gerar dados de referência confiáveis.

b) Inspeção de Referência e o "Marco Zero"

Com a base documental consolidada, executa-se a primeira inspeção de referência utilizando ROVs e sonares, idealmente logo após o enchimento inicial do túnel (otimizando garantias) ou no ciclo atual de operação. Essa inspeção busca confirmar a geometria, mapear patologias e validar o cenário atual contra o histórico, estabelecendo o "marco zero" de dados da estrutura. Além desses produtos este módulo produzirá Indice de Condição Estrutural, exposto a seguir.

$$ICE = \sum(P_i \times S_i \times E_i)$$

Onde:

P_i= Peso da anomalia (0 a 10); S_i = Severidade (0 a 10); E_i Extensão espacial (0 a 10).

sendo $E_i = \frac{\text{Comprimento da anomalia}}{\text{Comprimento do túnel}}$*10

Naturalmente, o peso da anomalia e os tipos de patologia variará conforme o túnel e conforme o avaliador, mas sempre valorando as patologias com foco na sua agressividade conforme exemplo da Tabela *2*. Da mesma forma a avaliação da Severidade (S_i), a Tabela *3*.

Tabela 2 – Sugestão de P_i

Patologia	Peso
Erosão profunda (>xmetros)	10
Desplacamento de revestimento	6
Infiltração ativa	5
Fissuração moderada	4
Abrasão superficial	3

Tabela 3 – Sugestão de S_i

Nível	Critério
10	Colapso em potencial
7	Estrutural relevante
5	Funcional moderado
3	Funcional leve
1	Estético

Com a continuidade de verificação do Indice de Condição Estrutural é possível verificar aceleração da degradação, estabilização e o comportamento pós reparo.

$$\Delta ICE = \frac{ICE_t - ICE_{t-1}}{\Delta t}$$

c) O DNA Estratégico e a Função Social

O modelo deve avaliar a função estratégica: se é um túnel de abastecimento de água (população afetada, impacto sanitário, impacto hospitalar, risco político/social) ou associado à geração de energia (com foco em perda de produção, dano à terceiros, sansões regulatórias e penalidades contratuais) Essa diferenciação é essencial para garantir que o peso das consequências econômicas e sociais seja considerado na análise global e devem emitir um valores para os Impactos social, econômico, ambiental, regulatório. Com isso é possível criar um Índice de Criticidade Estratégica ($ICEst$).

$$ICEst = (I_s + I_e + I_a + I_r)$$

Onde:
I_s = Impacto social; I_e= Impacto econômico; I_a = Impacto ambiental, I_r = Impacto regulatório

Também há de ponderar o Risco (R), relacionando a probabilidade de falha (Pf) e a consequencia da ocorrência da falha (Cf).

$$R = P_f \times C_f$$

Onde:
P_f = Probabilidade de falha; C_f = Consequência da falha

A bibliografia é vasta quando se trata de elencar probabilidade e consequência, como exemplo a Tabela *4* mostra aspectos a serem considerados nesse quesito[6], [7].

Tabela 4 – Aspectos a serem considerados na definição de Probabilidade e Consequência

Aspectos a serem considerados em	
Probabilidade de Falha	**Consequência da Falha**
Evolução do ICE	Impacto humano
Transientes hidráulicos	Impacto operacional
Histórico operacional	Impacto econômico
Geologia desfavorável	Impacto ambiental
Comportamento estrutural	Impacto reputacional

d) Cronogramas "Vivos" e Diagnóstico de Alta Precisão

Nesta metodologia, o calendário não dita as manutenções; os dados ditam. Cada nova inspeção recalibra a modelagem. As capturas de realidade e os mapas 3D gerados pelos sensores instalados nos veículos subaquáticos são submetidos a uma análise rigorosa por engenheiros civis, geólogos e geotécnicos. Se a análise dos dados atesta estabilidade, os intervalos de inspeção são validados; se identificam anomalias, as frequências de monitoramento são ajustadas automaticamente. De forma prática é possível dizer que a periodicidade (T_{nova}) é função dos índices discutidos anteriormente.

$$T_{nova} = f(ICE, \Delta ICE, ICEst, R)$$

Ou seja, a estabilidade dos índices gera ampliações na periodicidade, degradação leva a diminuição e a melhora aponta para recalibrações.

O diferencial deste modelo é abandonar a lógica tradicional, de “inspecionar porque a data chegou” para “inspecionar porque a análise do ativo demonstrou necessidade”.

e) Matriz de Risco e Priorização de Ações

A matriz de risco é então formada pela probabilidade de ocorrência de falha e a consequência inerente à falha, emitindo uma Classe de Risco.

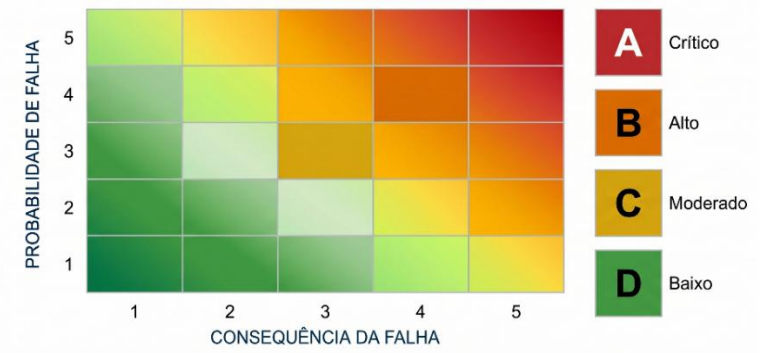


Figura 3 – Matriz de Risco

Também, deve ser realizada a priorização de ações relacionadas às anomalias verificadas/acompanhadas. A Tabela *5* mostra um exemplo de priorização separadas por classes.

Tabela 5 – Classes de priorização de ações

Classe	Critério
Classe A — Emergencial	risco crítico; inspeção imediata; redução operacional; esvaziamento planejado; reparo prioritário.
Classe B — Alta Prioridade	aumento de frequência de monitoramento; inspeções complementares; instrumentação adicional.
Classe C — Monitoramento Controlado	estabilidade condicionada; acompanhamento periódico.
Classe D — Observação	anomalias sem progressão relevante.

A matriz de risco relacionada à priorização de ações encerra os módulos discutidos acimam reiniciando rodadas de verificação conforme as periodicidades definidas.

3.1. Produtos do modelo

O ápice dessa integração é entregar um diagnóstico cirúrgico e de alto valor agregado, a Tabela *6* expõe os produtos desejados dessa análise. A modelagem traduz o comportamento complexo do sistema em relatórios técnicos profundos para os especialistas, e, simultaneamente, em informações claras, visuais e justificadas para os tomadores de decisão, permitindo que a alocação de recursos deixe de ser reativa e passe a ser proativa, mitigando impacto financeiro e social que uma parada prolongada da estrutura possa gerar.

Tabela 6 – Produtos do modelo

Item	Resultado
Índice de condição estrutural (ICE)	0–100
Tendência de degradação (ΔICE)	crescente/estável
Índice de Criticidade Estratégica ($ICEst$).	0–100
Classe de risco	A–D
Periodicidade de inspeção T_{nova}	variável

4. A PRÁTICA: ESTUDOS DE CASO REAIS

O Brasil possui um histórico relevante de colapsos em túneis hidráulicos, muitos deles associados a impactos operacionais significativos e prejuízos expressivos para seus operadores e investidores. Esses eventos evidenciam a vulnerabilidade desses ativos quando não monitorados de forma estruturada ao longo do tempo.

Durante o período da pandemia, por exemplo, ocorreu o colapso de um túnel pertencente a uma usina hidrelétrica com capacidade instalada de 120 MW. Como consequência, a usina permaneceu fora de operação por aproximadamente seis

meses. Considerando um Preço Médio de Energia Hidrelétrica (PMEH) de R$ 220,80/MWh, a perda de receita pode ser estimada (R_P)da seguinte forma:

$$R_P = P * 24 * d * PMEH$$

Sendo P a potência instalada e d o número de dias de parada.

Esse valor representa apenas a perda direta de receita associada à indisponibilidade da usina, não contemplando custos adicionais como obras de reabilitação, mobilização emergencial de equipes, contratação de serviços especializados, prejuízos com a compra de energia para reposição, penalidades contratuais e eventuais impactos no mercado de energia.

4.1. O Preço da Gestão Reativa: O Custo de Operar "Às Cegas"

4.1.1. O colapso do túnel da UHE Glendoe na Escócia

A Usina Hidrelétrica de Glendoe (100 MW) sofreu um colapso no túnel de adução. Judicialmente, a falha foi atribuída à deterioração da rocha junto ao túnel. Sendo um desabamento progressivo, não há momento exato da ruptura. Sinais críticos iniciaram com ruídos anômalos em 30 de junho de 2009, culminando em uma pluma de sedimentos em 4 de agosto. Foi necessária a construção de um túnel by-pass com cerca de 600m de comprimento. O incidente paralisou a usina por três anos, até agosto de 2012. A falha custou cerca de £100 milhões[8].



Figura 4 – Colapso de adução da UHE Glondoe. Brox(2022)[9]

4.1.2. Ruptura túnel Hidrelétrica Kargi na Túrquia

O projeto hidrelétrico de Kargi, de 120 MW localizado no centro-norte da Turquia, na região da Anatólia. Um total de três colapsos principais foram confirmados durante o primeiro ano de operações, com um volume total de cerca de 2000 m³, incluindo um único desabamento que resultou em quase 75% de obstrução do túnel, e um dos desabamentos se estendendo por 34 m de altura. A Figura *1*Figura 5Figura *1* apresenta um dos grandes colapsos que ocorreram no projeto hidrelétrico de Kargi [9]



Figura 5 – Colapso de trecho do túnel de Kargi. Brox(2022)[9]

4.2. O Sucesso da Inteligência de Ativos com ROVs

4.2.1. Detecção Precoce e Prevenção (PCH no Brasil)

Durante uma inspeção com ROV em uma Pequena Central Hidrelétrica, o mapeamento 3D detectou irregularidades na seção do túnel. O detalhe crucial: não havia detritos visíveis no fundo, pois a água já os havia levado. A tecnologia evitou um alarme falso seguro; a área foi classificada para monitoramento contínuo. Meses depois, uma nova passagem do ROV confirmou o desprendimento de grandes blocos de rocha no local exato, permitindo uma intervenção planejada antes de um colapso severo[1]

4.2.2. Monitoramento Evolutivo (Túnel Paute Fase C, Equador)

A UHE Paute-Molino está localizada no rio Paute, no sul do Equador. Possui capacidade instalada de 1075 MW, gerada por 10 unidades Pelton, projetadas para uma vazão de projeto de 200 m3/s conduzidos por dois túneis de 6,3km e diâmetros entre 7 e 8 metros. No ano de 2014 foi realizada uma inspeção visual onde foram verificados diversos vazios e entre 2016 e 2021 foram realizadas inspeções com ROV de forma a quantificar os vazios e escombros, evidenciados na Figura *2*, permitindo o planejamento dos tratamentos.

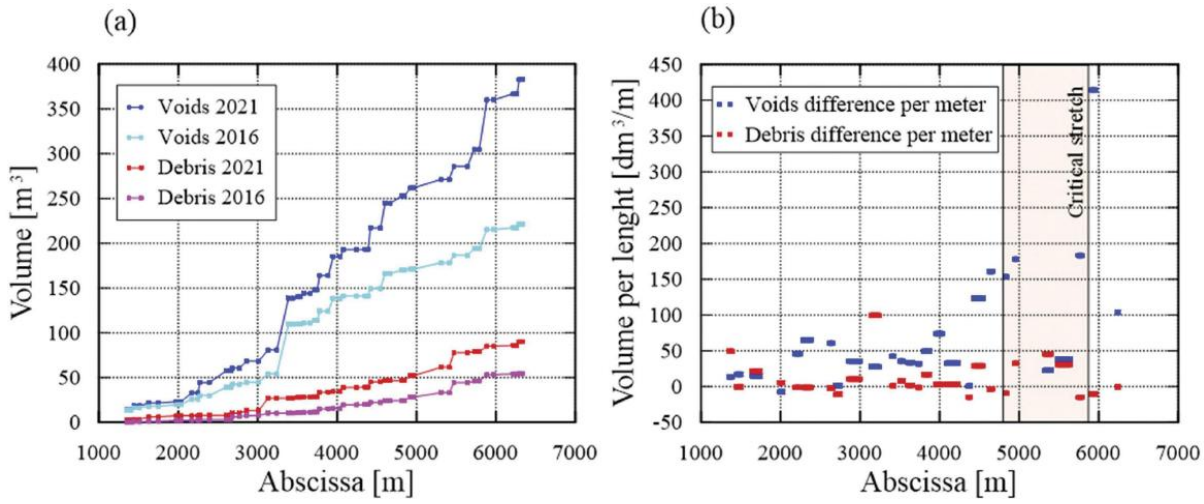


Figura 4 – Comparação quantitativa entre as inspeções de 2021 e 2016 do túnel de adução quanto a (a) volumes acumulados de detritos e (b) volumes de detritos por unidade de comprimento. Lopez et al. (2023) [2]

4.3. Eficiência em Longas Distâncias (Snowy Hydro, Austrália)

A Snowy Hydro, uma empresa de geração de energia australiana, utilizou ROVs de longo alcance para inspecionar um total de 69 km em seis túneis diferentes. Sem esvaziar os túneis (o que induziria enorme estresse estrutural na rocha), o ROV realizou excursões de até 12 km de distância a partir de um único ponto de acesso. A operação entregou um modelo 3D digital das condições do túnel enquanto reduzia drasticamente o tempo de paralisação da geração de energia [10]



Figura 4 – Vista para o ROV Sabertooth, posicionado próximo á tomada *d'água*.[10]

5. ANÁLISE ECONÔMICA: O CUSTO DA REATIVIDADE VS. PREVENÇÃO

Considerando o exemplo do túnel que colapsou durante a pandemia, apresentado no tópico anterior, e estimando que os custos diretos de recuperação tenham atingido aproximadamente R$ 5 milhões, com um período de indisponibilidade de cerca de seis meses, o prejuízo consolidado ultrapassa R$ 120 milhões, considerando apenas a perda de receita operacional.

Observando novamente, os mesmos parâmetros utilizados no exemplo da UHE que sofreu o colapso durante a pandemia, mas aplicados ao setor de saneamento básico, a interrupção de um túnel com vazão de 30 m³/s, responsável pelo abastecimento de uma região antropizada, poderia gerar perdas extremamente significativas.

Adotando um valor médio de R$ 5,00 por metro cúbico de água transportada e um período de indisponibilidade de seis meses, o prejuízo associado apenas ao volume de água não entregue seria de aproximadamente R$ 2,33 bilhões.

Neste caso, o investimento necessário para a implementação do modelo de manutenção preventiva, considerando a mesma referência utilizada no caso da UHE, representaria aproximadamente 0,05% do prejuízo potencial estimado para o cenário de saneamento básico.

6. BENEFÍCIOS DE LONGO PRAZO E VALORAÇÃO DO ATIVO

Além da redução direta de perdas operacionais, a adoção de um modelo estruturado de manutenção preventiva baseado em risco proporciona benefícios adicionais relevantes na gestão de ativos hidráulicos.

Do ponto de vista de *valuation*, ativos que possuem histórico consistente de inspeção, monitoramento e controle de integridade tendem a apresentar maior valor percebido em processos de venda ou concessão, uma vez que reduzem incertezas associadas ao desempenho futuro.

Em relação a seguros, a mitigação de riscos estruturais por meio de programas de manutenção preventiva pode resultar em redução significativa nos prêmios, à medida que o perfil de risco do ativo se torna mais controlado e previsível.

Por fim, sob a ótica de reputação e ESG, a adoção de práticas preventivas demonstra responsabilidade técnica e compromisso com a continuidade operacional e o impacto social, especialmente em sistemas críticos como geração de energia e abastecimento de água. Adicionalmente, a gestão proativa de ativos permite uma alocação mais eficiente dos recursos humanos e financeiros, otimizando o ciclo de vida da infraestrutura ao priorizar intervenções onde a probabilidade e a consequência da falha são mais críticas [11].

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A gestão de túneis hidráulicos exige uma mudança de cultura técnica e regulatória. No setor de barragens, as inspeções de segurança são obrigatórias e regulamentadas por lei, refletindo o reconhecimento do risco associado a essas estruturas. No entanto, túneis hidráulicos, embora também sejam ativos críticos para a continuidade operacional de sistemas de geração de energia e abastecimento de água, ainda não estão submetidos a um nível mínimo de exigência normativa compatível com sua criticidade operacional, econômica e social.

Essa assimetria precisa ser discutida. A ausência de risco direto à vida humana não implica ausência de criticidade. Falhas em túneis hidráulicos podem gerar impactos operacionais severos, prejuízos econômicos expressivos e, no caso do saneamento, consequências sociais relevantes associadas à interrupção do abastecimento.

Apesar da ausência de uma normativa específica consolidada para túneis hidráulicos, a evolução da gestão desses ativos não deve depender exclusivamente de um futuro processo regulatório. Até que diretrizes formais sejam estabelecidas, cabe aos gestores adotar metodologias estruturadas de avaliação de risco, capazes de integrar condição estrutural, dados operacionais e impacto econômico na tomada de decisão.

A modelagem integrada de risco estrutural e econômico proposta neste trabalho oferece uma base objetiva para essa evolução, permitindo classificar ativos, priorizar intervenções e justificar investimentos em manutenção preventiva com critérios técnicos e econômicos.

8. PALAVRAS-CHAVE

Túneis Hidráulicos, Integridade Estrutural, Sustentabilidade Econômica, Estratégias

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] F. Iannotta e D. J. Malak, “Preventive Maintenance Program Through Underwater Inspections with ROV and Sonar: A Strategic Approach to Reducing Downtime and Costs in Hydraulic Tunnels Failures. Hibbard Inshore Brasil”, 2025.

[2] S. Lopez, F. Micheli, e M. Buestan, “Observations on the condition of a hydraulic pressure tunnel through an ROV survey”, em *Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World- Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC 2023*, CRC Press/Balkema, 2023, p. 310–317. doi: 10.1201/9781003348030-38.

[3] R. E. Goodman, *Introduction to Rock Mechanics, 2E*. 1989.

[4] Z. Zhou, T. Ling, F. Huang, e M. Zhang, “The Face Stability Analysis of Shield Tunnels Subjected to Seepage Based on the Variational Principle”, *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, nº 24, dez. 2022, doi: 10.3390/su142416538.

[5] S. Ghimire, K. K. Panthi, e K. Vereide, “Hydraulic Transient Impact on Surrounding Rock Mass of Unlined Pressure Tunnels”, *Water (Switzerland)*, vol. 15, nº 22, nov. 2023, doi: 10.3390/w15223894.

[6] É. Du, R. Dans, L. G. De, L. A. Sécurité, e D. U. Barrage, “RISK ASSESSMENT IN DAM SAFETY MANAGEMENT A reconnaissance of benefits, methods and current applications”, 2005. [Online]. Disponível em: http://www.icold-cigb.org./

[7] T. World Bank Group, “Technical Note on Potential Failure Mode Analysis”, 2021. [Online]. Disponível em: www.worldbank.org

[8] S. R. Hencher, “The Glendoe Tunnel Collapse in Scotland”, *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 52, nº 10, p. 4033–4055, out. 2019, doi: 10.1007/s00603-019-01812-w.

[9] D. Brox, “Hydropower tunnel failures-Risks and causes”, 2022.

[10] Hibbard Inshore, “ROV Underwater Inspection of Long Tunnels for Snowy Hydro”, Acessado em 01/05/2026.

[11] B. H. MacGillivray, P. D. Hamilton, J. E. Strutt, e S. J. T. Pollard, “Risk analysis strategies in the water utility sector: An inventory of applications for better and more credible decision making”, março de 2006. doi: 10.1080/10643380500531171.



Bruno NEVES

Possui bacharelado em engenharia civil pela Universidade da Marília, especialização em Segurança de Barragens pela UFBA e Mestrado em Engenharia Civil pela PUC-Rio. Sua carreira se concentra em projetos alta complexidade, incluindo barragens, túneis, canais e usinas de energia. Presta serviços especializados de consultoria em engenharia e representa a Carpi no Brasil e no Cone Sul, conectando soluções globais de estanqueidade à segurança e desempenho de ativos para infraestrutura.



Fabio IANNOTTA

Graduado em Tecnologia pelo Campus Tortona, na Itália, possui credenciais em Liderança, Gestão e Impacto em Negócios pela Harvard Business School, com especialização em Gestão e Estratégia em andamento pela mesma instituição. É diretor da Hibbard Inshore Brasil, atuando em projetos complexos de inspeção e monitoramento subaquático de estruturas.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

POSSIBILIDADES PARA DEFINIÇÃO DE ZONA ALARP: FUNDAMENTOS CONCEITUAIS, ASPECTOS REGULATÓRIOS E BOAS PRÁTICAS INTERNACIONAIS

Mariana da COSTA
Engenheira Civil - GWS Engenharia

Ana Caroline ÁGUIDO
Engenheira Ambiental - GWS Engenharia

Lucas Samuel Santos BRASIL
Engenheiro Civil - GWS Engenharia

Robert Nagai Gonçalves da CRUZ
Engenheiro Civil - GWS Engenharia

RESUMO

A gestão de riscos é um elemento central para a segurança e a sustentabilidade de barragens de rejeitos de mineração, considerando o elevado potencial de consequências associado a falhas estruturais. No Brasil, a adoção de abordagens baseadas em risco tem avançado com a incorporação do princípio ALARP nas regulamentações de segurança. A Resolução ANM nº 95/2022 formaliza o conceito de *As Low As Reasonably Practicable*, ou tão baixo quanto razoavelmente praticável. A Resolução ANM nº 220/2025 reforça essa abordagem ao definir ALARP como a condição em que ações adicionais se tornam grosseiramente desproporcionais em relação ao nível de redução de risco alcançado. Este trabalho analisa a incorporação do ALARP na prática regulatória brasileira e discute suas implicações para relatórios técnicos, em especial a necessidade de justificar a região ALARP com base em alternativas tecnicamente viáveis e na proporcionalidade custo-benefício. A metodologia baseia-se na análise documental de arcabouços regulatórios e em uma revisão conceitual, incluindo a comparação com boas práticas internacionais, como o *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM), que requer a redução de riscos a níveis ALARP e a governança documentada do processo decisório. Os resultados indicam que a consolidação do ALARP fortalece a rastreabilidade das decisões, a robustez técnica e a transparência regulatória, contribuindo para critérios mais consistentes na definição e justificativa da região ALARP em estruturas geotécnicas.

ABSTRACT

Risk management is central to the safety and sustainability of mining tailings dams, given the high potential consequences associated with structural failures.

In Brazil, the adoption of risk-informed approaches has advanced with the incorporation of the ALARP principle into safety regulations. Resolution ANM No. 95/2022 formalizes the concept of "As Low As Reasonably Practicable". Resolution ANM No. 220/2025 reinforces this approach by defining ALARP as the condition in which additional actions become grossly disproportionate to the level of risk reduction achieved. This paper analyzes the incorporation of ALARP into Brazilian regulatory practice and discusses its implications for technical reports, particularly the need to justify the ALARP region based on technically feasible alternatives and cost-benefit proportionality. The methodology is based on document analysis of regulatory frameworks and a conceptual review, including comparison with international best practices such as the Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM), which requires risk reduction to ALARP levels and documented decision-making governance. The results indicate that the consolidation of ALARP strengthens decision traceability, technical robustness, and regulatory transparency, supporting more consistent criteria for defining and justifying the ALARP region in geotechnical structures.

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens de mineração envolve decisões sob incerteza, com potencial para consequências severas a jusante. Nesse cenário, a regulação baseada em risco busca estabelecer critérios e processos decisórios capazes de tornar a gestão de segurança mais consistente, rastreável e comparável entre estruturas e empreendedores. A incorporação explícita do princípio ALARP pela Agência Nacional de Mineração (ANM) representa um marco na evolução do arcabouço regulatório brasileiro [1].

O ALARP fundamenta-se na ideia de redução contínua do risco até o ponto em que novas medidas deixem de ser razoavelmente praticáveis, por se tornarem amplamente desproporcionais ao benefício adicional de redução de risco, considerando custo-benefício, viabilidade técnica, tempo e esforço [1][2]. Em paralelo, boas práticas internacionais para gestão de rejeitos, como o GISTM, também exigem que o projeto, a operação e as intervenções em instalações existentes visem reduzir o risco para um nível ALARP, com governança e documentação apropriadas [3].

Apesar da consolidação normativa, um desafio recorrente em avaliações e relatórios técnicos é a demonstração objetiva de que o risco residual se encontra efetivamente na zona ALARP. Este artigo contribui para a discussão desse problema ao (i) revisar fundamentos conceituais e decisórios do ALARP, (ii) discutir a incorporação do princípio nas resoluções da ANM e (iii) sistematizar elementos práticos para apoiar a definição e a justificativa da zona ALARP em estruturas geotécnicas.

1.1 Fundamentos Conceituais do ALARP e da Tolerabilidade de Risco

O conceito ALARP se insere em um modelo de tolerabilidade normalmente representado por três faixas: riscos amplamente aceitáveis, riscos toleráveis se ALARP e riscos inaceitáveis. A Resolução ANM nº 220/2025 explicita definições para “risco aceitável” e “risco inaceitável”, criando uma base normativa para estruturar o raciocínio de tolerabilidade e a necessidade de controles adicionais [2].

No cerne do ALARP está o teste de proporcionalidade entre (i) o risco evitável por medidas adicionais e (ii) o “sacrifício” necessário para implementá-las, medido por recursos (custos, tempo, esforço, complexidade) [1][2]. Orientações consolidadas do *Health and Safety Executive* (HSE), amplamente citadas na literatura de engenharia de segurança, descrevem que a aceitação de não implementação demanda evidência de que os custos seriam *grossly disproportionate* (grosseiramente desproporcionais) em relação ao benefício da redução incremental do risco [4].

A implicação prática é que “estar em ALARP” não é apenas um nível numérico em matriz de risco: é o resultado de um processo, no qual alternativas são levantadas, triadas, comparadas e documentadas. Assim, a zona ALARP deve ser entendida como uma região na qual a operação pode ocorrer desde que haja demonstração de que todas as medidas razoavelmente praticáveis foram adotadas, e que medidas adicionais foram rejeitadas apenas quando justificadamente desproporcionais [1][4].

1.2 Marco Regulatório Brasileiro

1.2.1 Resolução ANM nº 95/2022: formalização do ALARP

A Resolução ANM nº 95/2022 consolida atos normativos sobre segurança de barragens de mineração e define ALARP como “tão baixo como razoavelmente exequível”, estabelecendo que esforços de redução devem prosseguir até que o sacrifício adicional se torne amplamente desproporcional à redução adicional alcançada [1]. Essa definição cria um requisito implícito de demonstração: relatórios de segurança e análises de risco precisam registrar quais medidas foram avaliadas e porque foram implementadas ou rejeitadas.

1.2.2 Resolução ANM nº 220/2025: reforço conceitual e padronização de linguagem

A Resolução ANM nº 220/2025 mantém e reforça o conceito ao definir ALARP como uma classificação de risco atingida quando ações adicionais forem amplamente desproporcionais à redução de risco alcançada [2]. Além disso, explicita “risco aceitável” e “risco inaceitável”, contribuindo para um vocabulário regulatório mais uniforme e compatível com modelos clássicos de tolerabilidade [2]. A norma também apresenta cronograma de vigência escalonada para dispositivos específicos, fator relevante para planejamento de adequações organizacionais e metodológicas [2].

1.3 Boas Práticas Internacionais: Contribuições do GISTM

O *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM) estabelece um padrão global com foco em evitar falhas catastróficas e alcançar “*zero harm*” (sem fatalidades), estruturado em requisitos auditáveis ao longo do ciclo de vida das instalações [3]. O GISTM explicita que avaliações de risco devem informar decisões de projeto e operação para minimizar risco a ALARP, abordando modos de falha e medidas para reduzir probabilidade e consequências [3].

Um aspecto prático particularmente útil para o contexto brasileiro é o tratamento de instalações existentes: quando a atualização (“upgrade”) não é viável ou não pode ser aplicada retroativamente, o padrão exige que a alta liderança aprove e documente medidas para reduzir probabilidade e consequências a um nível ALARP, com base e cronograma *risk-informed* [3]. Isso reforça que a demonstração de ALARP demanda governança, responsabilidade clara e rastreabilidade, além de argumentos técnicos.

2. METODOLOGIA

Este artigo utiliza abordagem qualitativa e normativa, baseada em: (i) análise documental das Resoluções ANM nº 95/2022 e nº 220/2025 para identificar definições, linguagem de tolerabilidade e implicações para evidências em relatórios técnicos [1][2]; (ii) revisão conceitual de critérios de proporcionalidade e julgamento ALARP, com apoio em orientação do HSE sobre demonstrações e “*gross disproportion*” [4]; (iii) *benchmark* com o GISTM para identificar elementos auditáveis e práticas de governança e decisão associadas à redução de risco a ALARP [3].

A análise foi organizada em eixos: (a) definição e fronteiras de tolerabilidade; (b) evidências mínimas para demonstração ALARP; (c) governança e rastreabilidade; (d) proposta de sistematização aplicável a avaliações de segurança.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO: ELEMENTOS PARA DEFINIR E JUSTIFICAR A ZONA ALARP

3.1. O ALARP como obrigação de processo e de evidência

As resoluções da ANM caracterizam ALARP por um critério de proporcionalidade ("amplamente desproporcional"), o que desloca a conformidade de um modelo puramente prescritivo para um modelo que exige demonstração argumentativa [1][2].

Assim, declarar que um risco está "em ALARP" sem registrar alternativas avaliadas, custos/recursos e ganhos incrementais tende a ser insuficiente sob uma leitura estrita do conceito.

3.2. Conjunto mínimo de evidências para relatórios técnicos (pacote ALARP)

Para apoiar consistência e auditabilidade, recomenda-se que relatórios incorporem um "pacote ALARP" composto por quatro blocos:

Bloco A — Base de risco e cenários credíveis

- Modos de falha credíveis e cenários representativos;
- Consequências (incluindo pessoas e ambiente) e principais incertezas.

Bloco B — Controles existentes e desempenho esperado (baseline)

- Controles preventivos e mitigatórios implementados;
- Dependências operacionais e limitações;
- Monitoramento e critérios de resposta.

Bloco C — Registro de opções (ALARP options register)

- Alternativas adicionais identificadas
- Engenharia/operacional/monitoramento/mitigação de consequências;
- Triagem de viabilidade técnica, prazo e constrangimentos;
- Estimativa do benefício (redução incremental de risco) versus sacrifício.

Bloco D — Teste de proporcionalidade e decisão rastreável

- Justificativa explícita do que foi adotado, programado ou rejeitado;
- Demonstração de desproporcionalidade quando aplicável;
- Registro da decisão e do risco residual.

Essa estrutura é coerente com a necessidade de "ações adicionais" *versus* "redução de risco alcançada" expressa na definição de ALARP nas resoluções da ANM [1][2] e com a lógica de demonstração ALARP descrita pelo HSE [4].

3.3. Alinhamento com GISTM: governança, liderança e documentação

O GISTM reforça que a redução a ALARP deve estar acoplada a governança e responsabilidade executiva, especialmente quando upgrades físicos não são viáveis [3]. Aplicado ao contexto brasileiro, isso implica que a zona ALARP não deve ser tratada apenas como "faixa em matriz", mas como um resultado de decisão governada, revisável e documentada, integrando risco, alternativas e justificativas.

4. PROCEDIMENTO PRÁTICO PARA DEFINIÇÃO DA ZONA ALARP

Com base nos marcos regulatórios e referências internacionais, propõe-se um procedimento em oito passos para estruturar demonstrativos de ALARP:

1. Definir o objeto de decisão (projeto, operação, desativação, descaracterização).
2. Identificar modos de falha credíveis e seus gatilhos.
3. Estimar consequências e mapear receptores vulneráveis.
4. Consolidar controles existentes e desempenho esperado.
5. Levantar alternativas adicionais (prevenção, mitigação, redução de consequência).
6. Triar viabilidade técnica, prazos, interferências e requisitos legais.
7. Aplicar teste de proporcionalidade, justificando adoção ou rejeição, compatível com o critério de desproporcionalidade das resoluções ANM [1][2] e com o raciocínio de "*gross disproportion*" do HSE [4].
8. Documentar decisão e risco residual, mantendo rastreabilidade, revisão e governança, em linha com práticas do GISTM [3].

5. CONCLUSÕES

A incorporação do princípio ALARP nas Resoluções ANM nº 95/2022 e nº 220/2025 representa um avanço na governança da segurança de barragens de mineração ao exigir decisões fundamentadas e rastreáveis, sustentadas por proporcionalidade entre recursos empregados e redução de risco alcançada [1][2]. O estudo evidenciou que a "zona ALARP" deve ser operacionalizada como resultado de um processo documentado: identificação de modos de falha, inventário de controles, avaliação de alternativas e justificativa de proporcionalidade, evitando declarações genéricas. A aproximação com boas práticas internacionais, em especial o GISTM, reforça a necessidade de governança decisória e responsabilidade clara para demonstrar redução de risco a ALARP ao longo do ciclo de vida [3]. Por fim, foi proposto um procedimento prático e um pacote mínimo de evidências para apoiar relatórios técnicos mais consistentes, comparáveis e auditáveis sob o enfoque *risk-informed*.

6. PALAVRAS-CHAVE

ALARP; Análise de Risco; Resolução ANM; Segurança de Barragens; Governança.

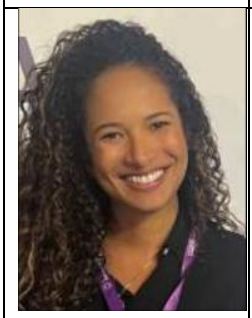
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. (2022). "Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022". Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasil.

[2] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. (2025). “Resolução ANM nº 220, de 16 de outubro de 2025”. Estabelece a disciplina aplicável às barragens de mineração. Brasil.

[3] GLOBAL TAILINGS REVIEW. (2020). “Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM)”.

[4] HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE – HSE. (s.d.). “HID's approach to ALARP decisions” – SPC/Permissioning/39.

	**Mariana da COSTA** Engenheira Civil (UFOP, 2021) e pós-graduada em Engenharia de Barragens (PUC Minas, 2023). Desde 2020 na GWS Engenharia na área de geotecnia. Atua com análises de risco em diferentes metodologias, PGRBM, governança geotécnica, segurança de estruturas geotécnicas e conformidade com o GISTM.
	**Ana Caroline ÁGUIDO** Engenheira Ambiental (UFMG, 2016) e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG, 2022). Engenheira Sênior na GWS Engenharia, atuando nas áreas de Hidrologia, Hidráulica, Segurança de Barragens, Estudos de Ruptura Hipotética, Projetos, Análises de Risco em diferentes metodologias, governança geotécnica e conformidade com o GISTM. Possui passagens pelas empresas Pimenta de Ávila e Tetra Tech.
	**Lucas Samuel Santos BRASIL** Engenheiro Civil (UFMG, 2002) e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG, 2005). Sócio-diretor da GWS Engenharia e professor da PUC Minas. Com passagens pela CEMIG, Pimenta de Ávila e Vale, tem experiência em Hidrologia, Hidráulica, Segurança de Barragens e Estudos de Ruptura Hipotética. Publicou trabalhos técnicos no Brasil e no exterior e integra o CBDB e a ASDSO.
	**Robert Nagai Gonçalves da CRUZ** Engenheiro Civil (UFMG, 2022) e mestrando em Geotecnia pela (UFSC). Desde 2021 atua na GWS Engenharia, com experiência em geotecnia aplicada, análises de risco por diferentes metodologias, elaboração de PGRBM e avaliação da segurança de estruturas geotécnicas.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE GRANDES ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA GE.4
BELÉM – PA, 21 E 22 DE SETEMBRO DE 2026

PROPOSTA DE NORMA TÉCNICA COM ENFOQUE NA GESTÃO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS E VALES A JUSANTE

Vitor Hugo Pereira de Morais
Pesquisador Colaborador – Universidade de Campinas

Alan Vaz Lopes
Especialista em Recursos Hídricos - Agência Nacional de Águas e Saneamento

Othon José Rocha
Engenheiro Civil e Mestre em Segurança e Defesa Civil - Fractal Engenharia

Tiago Zenker Gireli
Professor Livre Docente – Universidade de Campinas

RESUMO

Este artigo apresenta as premissas adotadas para a elaboração de um texto normativo com enfoque na gestão da segurança de barragens e vales a jusante. Atualmente em fase de tramitação na Câmara de Estudos Especiais (CEE) nº 255 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a proposta de norma técnica visa suprir as lacunas existentes na integração dos processos de gestão de risco e emergências em vales a jusante de barragens, a partir de um modelo estruturado e denominado Sistema Integrado de Gestão de Segurança - Barragem e Vale a Jusante (SIGBV). O modelo baseia-se em cinco componentes interdependentes: contexto, estrutura de governança, gestão integrada de riscos, gestão integrada de emergências e avaliação de desempenho. A proposta enfatiza a proteção da vida, a responsabilidade social e a articulação entre empreendedor, poder público e comunidades potencialmente afetadas. Alinhado à referenciais nacionais e internacionais, o SIGBV consolida uma abordagem sistêmica e orientada à resiliência, voltada à redução de vulnerabilidades e ao fortalecimento da prontidão e resposta a emergências envolvendo barragens. Destaca-se o caráter inédito do texto normativo proposto, ao constituir a primeira iniciativa nacional a tratar, de forma integrada, a segurança dos vales a jusante, superando o enfoque tradicional centrado exclusivamente na integridade estrutural da barragem. Ao incorporar dimensões territoriais, sociais, institucionais e operacionais em um arcabouço unificado, estabelece um marco conceitual e metodológico para a governança colaborativa do risco, ampliando o escopo para uma perspectiva sistêmica.

ABSTRACT

This paper presents the guiding principles adopted in the development of a proposed technical standard focused on the integrated safety management of dams and downstream valleys. Currently under development within the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT) Special Study Commission No. 255 (CEE-255), the proposed standard aims to address existing gaps in the integration of risk and emergency management processes for downstream valleys through a structured framework referred to as the Integrated Safety Management System – Dam and Downstream Valley (SIGBV).

The proposed framework is based on five interdependent components: Context, Governance Structure, Integrated Risk Management, Integrated Emergency Management, and Performance Evaluation. It emphasizes the protection of human life, social responsibility, and coordinated action among dam owners, public authorities, and potentially affected communities.

Aligned with national and international references, the SIGBV establishes a systemic and resilience-oriented approach aimed at reducing vulnerabilities while strengthening preparedness and emergency response capabilities related to dam incidents. The proposed standard represents the first national initiative to address downstream valley safety through an integrated management framework, moving beyond the traditional approach focused exclusively on the structural integrity of dams. By incorporating territorial, social, institutional, and operational dimensions into a unified framework, it establishes a conceptual and methodological basis for collaborative risk governance and broadens the scope of dam safety toward a comprehensive systems-based perspective.

1. INTRODUÇÃO

As normas técnicas desempenham papel fundamental na promoção da segurança, da qualidade e da uniformização de produtos, serviços e processos, estabelecendo requisitos, diretrizes e boas práticas reconhecidas nacional e internacionalmente. Além de contribuírem para a competitividade das organizações, constituem importantes instrumentos de padronização técnica permitindo ganhos de eficiência em diferentes setores da sociedade.

No âmbito da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), foi constituída, em 2021, a Comissão de Estudos Especiais de Barragens (CEE-255), com a finalidade de elaborar normas técnicas aplicáveis ao projeto, execução, monitoramento, manutenção, reparo e inspeção de barragens e de suas estruturas complementares. Como resultado desse trabalho, foram publicadas a ABNT NBR 17188:2024, que estabelece diretrizes para estudos de ruptura hipotética de barragens (*Dam Break*), e a ABNT NBR 17189:2024, que define critérios para a instrumentação de auscultação de barragens de acumulação de água.

Embora essas normas representem avanços significativos para a segurança de barragens, ainda permanecem importantes lacunas relacionadas à gestão integrada dos riscos e das emergências nos vales localizados a jusante. Emergências envolvendo barragens exigem elevado grau de coordenação entre empreendedores, órgãos públicos e comunidades potencialmente afetadas, de forma a assegurar respostas tempestivas, coordenadas e orientadas prioritariamente à proteção da vida e à redução dos impactos decorrentes de um eventual acidente.

Diante dessa lacuna, este artigo apresenta a proposta de estrutura normativa do Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens e Vales a Jusante (SIGBV), descrevendo seus princípios, componentes e processos essenciais. A proposta organiza, em uma abordagem sistêmica, os processos relacionados à gestão da segurança da barragem e do território potencialmente afetado, promovendo maior integração entre gestão de riscos, gestão de emergências, governança e avaliação de desempenho.

A proposta foi desenvolvida para as barragens abrangidas pela Política Nacional de Segurança de Barragens, podendo ser adaptada às diferentes tipologias de empreendimentos, respeitando suas particularidades técnicas, operacionais e regulatórias. Seu propósito não é substituir as obrigações legais vigentes, mas organizá-las em um sistema integrado de gestão, complementado por diretrizes fundamentadas em normas técnicas e boas práticas nacionais e internacionais.

Parte-se do entendimento de que, embora a barragem e o vale a jusante possuam características distintas, seus processos de gestão são fortemente interdependentes. Dessa forma, a integração entre esses elementos favorece a coordenação institucional, fortalece a governança colaborativa e amplia a capacidade de prevenção, preparação, resposta e melhoria contínua da segurança.

A proposta normativa foi elaborada no âmbito do Grupo de Trabalho 7 da CEE-255 e encontra-se em fase final de consolidação. Após sua aprovação pela Comissão de Estudos Especiais, será submetida à consulta pública da ABNT, permitindo a participação da comunidade técnica e científica antes de sua publicação definitiva.

2. FUNDAMENTAÇÃO LEGAL E NORMATIVA

A norma técnica proposta foi estruturada de modo a atender à Política Nacional de Segurança de Barragens, estabelecida pela Lei nº 12.334/2010 e alterada pela Lei nº 14.066/2020. Adicionalmente, foram utilizadas como base referências normativas nacionais e internacionais amplamente reconhecidas, de modo a assegurar alinhamento com boas práticas contemporâneas em gestão de riscos, emergências, sustentabilidade e responsabilidade social.

A proposta não substitui as obrigações, responsabilidades e competências estabelecidas pela Política Nacional de Segurança de Barragens nem pelos demais instrumentos legais e regulatórios aplicáveis. Seu objetivo é organizar essas exigências em uma estrutura integrada de gestão, complementando-as com diretrizes e recomendações fundamentadas em normas técnicas e boas práticas nacionais e internacionais, de forma a fortalecer a integração entre a segurança da barragem e a gestão da segurança do vale a jusante.

A abordagem adotada incorpora princípios da ABNT NBR ISO 31000, especialmente no que se refere à identificação, análise, avaliação e tratamento de riscos de forma integrada e contínua, considerando as interações entre a barragem e o território a jusante.

No âmbito da gestão de emergências e da resposta a incidentes, a proposta está alinhada às diretrizes estabelecidas na ABNT NBR ISO 22320, no que tange à necessidade de estruturas de comando unificado, coordenação interinstitucional e definição clara de responsabilidades. Complementarmente, os conceitos relacionados ao sistema de aviso público foram fundamentados na ABNT NBR ISO 22322, assegurando a adoção de estratégias multicanais, a acessibilidade das mensagens e a efetividade da comunicação com populações em risco. A terminologia e os conceitos gerais de segurança e resiliência seguem as definições estabelecidas na EN ISO 22300, garantindo consistência conceitual ao longo da proposta.

Adicionalmente, a estrutura sistêmica e a abordagem por processos incorporam fundamentos da ABNT NBR ISO 14001, especialmente no que se refere ao ciclo de melhoria contínua (planejar, executar, verificar e agir), aplicado à gestão integrada da segurança.

Por fim, a proposta também se apoia nos princípios da ABNT NBR ISO 26000, ao enfatizar a proteção da vida, a transparência, o engajamento das partes interessadas e a consideração das vulnerabilidades sociais no território a jusante.

Dessa forma, o Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens e Vales a Jusante (SIGBV) consolida uma estrutura integrada de gestão, interdisciplinar e orientada à resiliência, fundamentada em normas reconhecidas internacionalmente e adaptada ao contexto regulatório e operacional brasileiro.

Ao organizar, de forma sistemática, requisitos legais, princípios normativos e boas práticas de gestão, a proposta contribui para o fortalecimento da segurança de barragens e da proteção das populações potencialmente afetadas.

3. PRINCÍPIOS E DIRETRIZES DO SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS E VALES A JUSANTE (SIGBV)

A proposta normativa fundamenta-se em princípios e diretrizes que orientam a implementação e a melhoria contínua do Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens e Vales a Jusante (SIGBV). Esses princípios estabelecem os fundamentos conceituais da gestão integrada da segurança e servem de referência para os requisitos e processos apresentados nos capítulos seguintes.

3.1. Objetivos do SIGBV

O Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens e Vales a Jusante (SIGBV) tem por objetivo fornecer uma estrutura de gestão destinada à integração dos processos relacionados à segurança da barragem e do território potencialmente afetado, promovendo ações coordenadas de prevenção, preparação, resposta e melhoria contínua.

O sistema busca fortalecer a governança entre os diversos atores envolvidos, proporcionando maior integração entre os processos de gestão de riscos, gestão de emergências e avaliação de desempenho, sempre com foco na proteção da vida, na redução das vulnerabilidades e no aumento da resiliência das comunidades.

A adoção do SIGBV constitui uma decisão estratégica do empreendedor e das instituições envolvidas, permitindo organizar de forma integrada os processos relacionados à segurança da barragem e do vale a jusante, sem substituir as obrigações legais e regulatórias vigentes.

3.2. Princípios Fundamentais do SIGBV

A proposta de norma estabelece princípios que orientam a implantação, operação e melhoria contínua do Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens e Vales a Jusante (SIGBV). Esses princípios constituem diretrizes gerais para a gestão integrada da segurança e devem orientar os processos de prevenção, preparação, resposta e melhoria contínua. A Tabela 1 traz de forma consolidada os princípios fundamentais.

Tabela 1. Princípios Fundamentais do SIGBV.

Princípios		**Diretrizes**
Estratégicos	Proteção da vida	Priorizar a preservação da vida e da dignidade humana em todas as decisões.
	Responsabilidade compartilhada	Promover atuação coordenada entre empreendedor, poder público e sociedade.
	Participação social	Estimular o envolvimento permanente das comunidades potencialmente afetadas.

Tabela 1. Princípios Fundamentais do SIGBV (continuação).

Princípios		Diretrizes
Operacionais	Prevenção e precaução	Priorizar ações antecipadas para redução dos riscos.
	Articulação permanente	Assegurar integração contínua entre instituições envolvidas.
	Decisão baseada em evidências	Fundamentar decisões em critérios técnicos e informações confiáveis.
Governança	Capacidade operacional	Manter recursos, equipes e procedimentos permanentemente preparados.
	Transparência	Garantir comunicação clara e acesso às informações de interesse público.

3.2.1 Proteção da Vida

A proteção da vida constitui o princípio fundamental do SIGBV e deve orientar todas as decisões relacionadas à gestão da segurança de barragens e de seus vales a jusante. As ações de prevenção, preparação, resposta e recuperação devem priorizar a preservação da vida, da dignidade humana e do bem-estar das populações potencialmente afetadas.

3.2.2 Responsabilidade Compartilhada

A gestão da segurança de barragens exige atuação integrada entre empreendedor, órgãos públicos e sociedade civil, respeitando as competências e responsabilidades definidas na legislação vigente. O SIGBV busca fortalecer essa cooperação por meio de mecanismos de coordenação, comunicação e definição clara de responsabilidades, favorecendo uma atuação conjunta e eficaz.

3.2.3 Participação Social

A participação ativa das comunidades potencialmente afetadas constitui elemento essencial para a efetividade do sistema. O SIGBV incentiva o envolvimento contínuo da população nas atividades de comunicação de riscos, capacitação, exercícios simulados e processos de avaliação do sistema, contribuindo para o fortalecimento da cultura de prevenção e da confiança entre as partes interessadas.

3.2.4 Prevenção e Precaução

A gestão da segurança deve privilegiar a antecipação dos riscos e a adoção de medidas preventivas sempre que possível. O princípio da precaução orienta a tomada de decisão diante de incertezas técnicas, priorizando ações capazes de reduzir vulnerabilidades e evitar ou minimizar consequências decorrentes de eventuais acidentes.

3.2.5 Articulação Permanente

A eficácia das ações de gestão depende da integração contínua entre os diversos agentes envolvidos. O SIGBV promove a articulação permanente entre empreendedores, órgãos de proteção e defesa civil, entidades públicas e demais instituições responsáveis pela gestão de riscos e emergências, favorecendo respostas coordenadas e oportunas.

3.2.6 Decisão Baseada em Evidências

As decisões relacionadas à segurança da barragem e do vale a jusante devem ser fundamentadas em informações técnicas confiáveis, incluindo estudos de risco, inspeções, monitoramento, modelagens, indicadores de desempenho e registros históricos. Essa abordagem contribui para maior transparência, rastreabilidade e efetividade do processo decisório.

3.2.7 Capacidade Operacional

O sistema deve manter condições permanentes de resposta compatíveis com os riscos identificados. Para isso, devem ser assegurados recursos humanos, infraestrutura, equipamentos, procedimentos operacionais, treinamentos e exercícios periódicos capazes de garantir atuação rápida e eficiente em emergência.

3.2.8 Transparência

A transparência deve orientar todas as etapas da gestão integrada da segurança. Informações relativas aos riscos, responsabilidades, procedimentos e estratégias de resposta devem ser disponibilizadas de forma clara, acessível e tempestiva às partes interessadas, fortalecendo a confiança institucional e a preparação das comunidades potencialmente afetadas.

3.3 Premissas para Implementação

A implementação do SIGBV pressupõe o conhecimento do contexto da barragem e do vale a jusante, a definição das responsabilidades institucionais, a integração entre os agentes envolvidos e a disponibilidade de mecanismos para identificação, avaliação e tratamento dos riscos.

A efetividade do sistema depende da atuação coordenada entre empreendedor, órgãos de proteção e defesa civil, entidades públicas e demais instituições com responsabilidades na gestão de riscos e emergências. Essa atuação deve ser sustentada por processos formais de comunicação, consulta, cooperação e compartilhamento de informações.

O SIGBV deve ser implementado considerando as características específicas de cada empreendimento e de seu território potencialmente afetado, permitindo que seus processos sejam proporcionais à complexidade, ao porte da barragem e às vulnerabilidades existentes.

3.4 Abordagem por Processos e Melhoria Contínua

O SIGBV adota uma abordagem por processos, estruturada de forma a integrar as atividades relacionadas à segurança da barragem e do vale a jusante em um sistema único e interdependente. Essa abordagem permite compreender as interações entre os processos, otimizar recursos e promover maior eficácia na gestão da segurança.

A implementação do sistema é fundamentada no ciclo de melhoria contínua PDCA (Planejar–Executar–Verificar–Agir), assegurando que os processos sejam continuamente monitorados, avaliados e aperfeiçoados em função das mudanças nas condições de risco, das lições aprendidas e da evolução das melhores práticas.

Os princípios apresentados neste capítulo constituem a base conceitual do SIGBV. A partir deles, o capítulo seguinte apresenta a estrutura do sistema e descreve seus cinco componentes interdependentes: Contexto, Estrutura e Governança, Gestão Integrada de Riscos, Gestão Integrada de Emergências e Avaliação de Desempenho.

4. SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS E VALES A JUSANTE (SIGBV)

Os princípios e diretrizes apresentados no Capítulo 3 estabelecem a base conceitual do SIGBV. Este capítulo apresenta sua estrutura organizacional e descreve os componentes responsáveis por operacionalizar esses princípios, organizando os processos necessários para a implementação de um sistema integrado de gestão da segurança da barragem e do vale a jusante.

A abordagem adotada fundamenta-se na interação contínua entre seus componentes, permitindo que as informações produzidas em cada processo subsidiem a tomada de decisão e promovam a melhoria contínua do sistema.

4.1 Estrutura Geral do Sistema

O Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens e Vales a Jusante (SIGBV) organiza a gestão da segurança em cinco componentes interdependentes, conforme ilustrado na Figura 1.

Em conjunto, esses componentes estruturam os processos necessários para a gestão integrada da segurança da barragem e do território potencialmente afetado.

Embora apresentados de forma sequencial para facilitar sua compreensão, os componentes não constituem etapas independentes, mas elementos de um sistema de gestão que interagem continuamente, compartilhando informações e retroalimentando o processo de tomada de decisão.

Essa interação assegura que os resultados obtidos em cada componente contribuam para o aperfeiçoamento dos demais, promovendo a melhoria contínua do sistema.



Figura 1 – Componentes do SIGBV

A Tabela 2 sintetiza os objetivos, os requisitos mínimos e os resultados esperados de cada componente do SIGBV, servindo como referência para o detalhamento apresentado nas seções seguintes

Tabela 2. Estrutura dos componentes do Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens e Vales a Jusante (SIGBV)

Componente	Objetivo	Requisitos mínimos	Resultados esperados
Contexto	Compreender o ambiente físico, social, institucional e operacional da barragem e do vale a jusante.	• Caracterização da barragem e do reservatório • Caracterização do vale a jusante • Identificação das partes interessadas • Caracterização da população exposta • Levantamento da infraestrutura crítica e dos recursos disponíveis.	Relatório de diagnóstico integrado da barragem e do vale a jusante, identificando vulnerabilidades, capacidades e condicionantes para a gestão da segurança.

Tabela 2. Estrutura dos componentes do Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens e Vales a Jusante (SIGBV) (continuação).

Componente	Objetivo	Requisitos mínimos	Resultados esperados
Estrutura e Governança	Organizar os atores responsáveis pela implementação e coordenação do SIGBV.	• Definição das responsabilidades institucionais • Matriz de competências • Liderança compartilhada • Processos de comunicação e consulta • Mecanismos de coordenação institucional	Estrutura de governança formalmente estabelecida, com responsabilidades, fluxos de comunicação e mecanismos de coordenação definidos.
Gestão Integrada de Riscos	Identificar, analisar, avaliar e tratar os riscos relacionados à barragem e ao vale a jusante.	• Identificação dos riscos • Análise dos riscos • Avaliação dos riscos • Tratamento dos riscos • Monitoramento e revisão periódica	Matriz integrada de riscos e plano de tratamento priorizado, contemplando medidas estruturais e não estruturais.
Gestão Integrada de Emergências	Planejar, preparar e coordenar a resposta às situações de emergência.	• Planejamento para emergências • Programas de capacitação e treinamentos • Sistemas de aviso público • Logística de salvamento e acolhimento • Procedimentos operacionais de resposta	Plano integrado de preparação e resposta implementado, com recursos, infraestrutura e protocolos operacionais aptos à atuação em emergências.
Avaliação de Desempenho	Verificar a eficácia do SIGBV e promover sua melhoria contínua.	• Monitoramento do desempenho • Avaliação da conformidade e operacionalidade (ACO) • Tratamento de não conformidades • Ações corretivas e preventivas • Revisão contínua do sistema	Sistema continuamente monitorado e aperfeiçoado, com evidências de conformidade, desempenho e melhoria contínua.

4.2 Componentes do Sistema

A componente Contexto estabelece a base para a compreensão das características físicas, sociais, institucionais e operacionais do empreendimento e do território potencialmente afetado. A partir desse diagnóstico, a Estrutura e Governança organiza os atores envolvidos, define responsabilidades e estabelece os mecanismos de coordenação necessários para a implementação do sistema.

Com base nessas informações, a Gestão Integrada de Riscos identifica, analisa, avalia e trata os riscos associados à barragem e ao vale a jusante, fornecendo os subsídios técnicos para a Gestão Integrada de Emergências, responsável pelo planejamento, preparação e resposta às emergências.

A componente Avaliação de Desempenho monitora a eficácia dos processos implementados, verifica sua conformidade e identifica oportunidades de melhoria contínua. Os resultados obtidos retroalimentam os demais componentes do sistema, promovendo sua atualização contínua e assegurando a adaptação do SIGBV às mudanças nas condições de risco, no contexto operacional e nas necessidades das partes interessadas.

4.2.1 Contexto

A componente Contexto tem como objetivo estabelecer a base para compreensão do ambiente físico, social, institucional e operacional no qual a barragem e o vale a jusante estão inseridos, subsidiando os processos de gestão de riscos e gestão de emergências.

Estabelece a base estruturante do SIGBV, permitindo compreender as condições físicas, ambientais, sociais, institucionais e operacionais nas quais o sistema será implementado. Essa caracterização deve ir além da descrição técnica da barragem, incorporando aspectos relacionados às vulnerabilidades existentes, à capacidade de resposta institucional e à dinâmica territorial.

A análise deve contemplar fatores ambientais, socioeconômicos e institucionais, incluindo a capacidade operacional dos órgãos de proteção e defesa civil, a organização das comunidades potencialmente afetadas, a existência de instrumentos municipais de gestão de riscos e a disponibilidade de recursos para resposta a emergências.

4.2.2 Estrutura e Governança

O componente Estrutura e Governança visa estabelecer a estrutura organizacional responsável pela implementação, coordenação e manutenção do SIGBV.

A estrutura de governança organiza os atores envolvidos na gestão da segurança, define responsabilidades e estabelece mecanismos permanentes de coordenação entre empreendedor, órgãos públicos e demais instituições participantes.

A proposta prevê a elaboração de matriz de competências institucionais, a definição dos processos de comunicação e consulta e o estabelecimento de mecanismos formais de coordenação, assegurando que a gestão de riscos e emergências seja conduzida de forma integrada e colaborativa.

4.2.3 Gestão Integrada de Riscos

O componente Gestão Integrada de Riscos busca estabelecer um processo contínuo para identificação, análise, avaliação e tratamento dos riscos associados à barragem e ao vale a jusante.

A gestão integrada de riscos constitui o núcleo técnico do SIGBV e fundamenta-se nos princípios da ABNT NBR ISO 31000, adaptados às especificidades da segurança de barragens.

A gestão deve considerar, de forma integrada, os riscos associados à estrutura da barragem, às condições do vale a jusante, às vulnerabilidades sociais e ambientais, à capacidade institucional de resposta e às mudanças nas condições físicas e operacionais do empreendimento. Esse processo compreende quatro etapas principais:

- **Identificação de riscos:** levantamento dos modos de falha da barragem, ameaças naturais e vulnerabilidades territoriais.
- **Análise de riscos:** avaliação integrada dos fatores hidrológicos, estruturais, operacionais, sociais e territoriais.
- **Avaliação de riscos:** priorização das ações considerando probabilidade de ocorrência, severidade das consequências, capacidade de resposta e tempo disponível para evacuação.
- **Tratamento de riscos:** implementação de medidas estruturais e não estruturais destinadas à redução dos riscos identificados.

4.2.4 Gestão Integrada de Emergências

O componente Gestão Integrada de Emergências compreende o conjunto de processos destinados ao planejamento, à preparação e à resposta coordenada às emergências envolvendo barragens e seus vales a jusante.

Fundamentada nos estudos desenvolvidos nos componentes Contexto, Estrutura e Governança e Gestão Integrada de Riscos, essa componente busca assegurar que os recursos humanos, materiais e institucionais necessários estejam disponíveis e organizados para atuação tempestiva, coordenada e eficaz.

A gestão integrada de emergências estrutura-se em quatro processos complementares: Planejamento, Preparação, Sistema de Aviso Público e Resposta, apresentados nas seções seguintes.

4.2.4.1 Planejamento

O planejamento estabelece as diretrizes necessárias para organização da resposta às emergências, definindo previamente os recursos, procedimentos, responsabilidades e mecanismos de coordenação institucional necessários para proteção da população potencialmente afetada.

Essa etapa é subsidiada pelos estudos de caracterização do vale a jusante e pela avaliação integrada dos riscos, permitindo identificar os cenários de emergência, as populações expostas, os recursos disponíveis e as necessidades operacionais para resposta.

Como resultado desse processo devem ser elaborados, implementados e periodicamente atualizados os instrumentos de planejamento da resposta, incluindo os planos de emergência, os planos de contingência, os procedimentos operacionais e os mecanismos de coordenação entre empreendedor, órgãos de proteção e defesa civil e demais instituições envolvidas.

4.2.4.2 Preparação

A preparação compreende as ações permanentes destinadas ao desenvolvimento da capacidade operacional necessária para resposta eficiente às emergências. Essas ações envolvem programas contínuos de conscientização e capacitação, planejamento da logística de salvamento e acolhimento, cadastramento dos recursos disponíveis e definição da infraestrutura necessária para atendimento às populações potencialmente afetadas.

Os processos de capacitação devem assegurar que as equipes do empreendedor, os órgãos públicos e demais instituições participantes conheçam suas atribuições, os procedimentos estabelecidos nos planos de emergência, as características do vale a jusante e os impactos potenciais decorrentes de um eventual acidente.

Nesse contexto, destacam-se os treinamentos internos, treinamentos do fluxo de comunicação, exercícios de mesa, seminários orientativos junto às comunidades e exercícios práticos de evacuação, conforme apresentado na Tabela 3.

A logística de salvamento e acolhimento deve ser planejada considerando a totalidade da população potencialmente afetada, incluindo grupos vulneráveis, infraestrutura disponível, recursos de transporte, locais de abrigo e demais meios necessários para execução das ações previstas nos planos de emergência.

Tabela 3 – Ações de capacitação e conscientização

Tipo de treinamento	**Público-alvo**
Treinamento expositivo interno	Equipes internas da barragem (operação, manutenção, segurança e gestão)
Treinamento do fluxo de comunicação	Equipes internas envolvidas na execução do plano de emergência (operação e comunicação)
Treinamento de mesa (*tabletop*)	Equipes internas, órgãos de proteção e defesa civil e instituições públicas
Seminário orientativo externo	Comunidades potencialmente impactadas no vale a jusante
Exercícios práticos de evacuação	Colaboradores do empreendimento e populações no vale a jusante

4.2.4.3 Sistema de Aviso Público

O Sistema de Aviso Público constitui um dos principais elementos da infraestrutura de emergência, sendo responsável pela disseminação tempestiva de informações às populações potencialmente afetadas.

Sua estrutura deve ser fundamentada nos princípios estabelecidos pela ABNT NBR ISO 22322 e compreender mecanismos complementares de notificação, destinados à orientação da população quanto às ações a serem adotadas, e de alerta, voltados à rápida captação da atenção diante da evolução de uma situação crítica.

A definição dos canais de comunicação deve considerar as características do vale a jusante, a distribuição espacial da população, a existência de grupos vulneráveis, a cobertura dos diferentes meios de comunicação e o tempo disponível para resposta.

Recomenda-se a adoção de estratégias multicanais, combinando sirenes, telefonia móvel, sistemas digitais, radiodifusão, mídias sociais e comunicação direta, assegurando redundância, acessibilidade e ampla cobertura das áreas sob risco.

O sistema deve ser continuamente monitorado, testado e avaliado, garantindo sua disponibilidade operacional, confiabilidade e efetividade, bem como a atualização periódica dos procedimentos e responsabilidades associados ao seu acionamento.

4.2.4.4 Resposta

A resposta corresponde ao conjunto de ações coordenadas executadas após a declaração de uma emergência, tendo como objetivo prioritário a proteção da vida e a redução dos danos humanos, materiais e ambientais.

A condução das operações deve ocorrer por meio de estrutura de comando unificado, apoiada em procedimentos operacionais padronizados previamente definidos nos planos de emergência e integrada aos órgãos de proteção e defesa civil e demais instituições competentes.

Durante a resposta, compete ao comando de operações acompanhar continuamente a evolução da emergência, coordenar a mobilização dos recursos disponíveis, promover a articulação entre as instituições envolvidas e decidir quanto ao acionamento dos sistemas de aviso público e das demais medidas de proteção à população potencialmente afetada.

As ações executadas durante a resposta devem ser registradas e posteriormente avaliadas, permitindo identificar oportunidades de melhoria, atualizar os procedimentos operacionais e fortalecer continuamente a capacidade de resposta do SIGBV.

4.2.5 Avaliação de Desempenho

O componente Avaliação de Desempenho tem por objetivo monitorar a eficácia do SIGBV e promover sua melhoria contínua. A avaliação de desempenho constitui o mecanismo de verificação da eficácia do SIGBV, sendo estruturada em três processos complementares: monitoramento do desempenho, avaliação da conformidade e operacionalidade e melhoria contínua.

O monitoramento deve contemplar a estrutura de governança, os estudos de risco, a atualização das manchas de inundação, a caracterização do vale a jusante, a realização de treinamentos, a participação das comunidades, a infraestrutura de emergência e a operacionalidade dos sistemas de comunicação e aviso público.

A Avaliação de Conformidade e Operacionalidade (ACO) deve analisar criticamente o desempenho do sistema, verificando sua aderência aos requisitos da norma, aos instrumentos legais aplicáveis e aos objetivos estabelecidos pelo SIGBV.

Os resultados obtidos devem subsidiar a implementação de ações corretivas e oportunidades de melhoria, promovendo a atualização contínua da estrutura de governança, dos processos de gestão de riscos, da gestão de emergências e dos recursos necessários para o funcionamento do sistema.

O monitoramento do desempenho do SIGBV deve ser realizado por meio de indicadores que permitam avaliar, de forma objetiva, a eficácia dos processos implementados e subsidiar a tomada de decisão para a melhoria contínua do sistema.

Os indicadores devem estar alinhados aos objetivos estabelecidos para cada componente do SIGBV, possibilitando acompanhar sua implementação, verificar sua efetividade e identificar oportunidades de aperfeiçoamento.

A Tabela 4 apresenta exemplos de indicadores de desempenho que podem ser utilizados para esse monitoramento.

Tabela 4 – Exemplos de indicadores de desempenho do SIGBV

Componente	**Indicador de desempenho**	**Finalidade**	**Fonte de evidência**
Contexto	Atualização periódica da caracterização do vale a jusante	Verificar se as informações utilizadas na gestão da segurança do vale a jusante permanecem atualizadas	Estudos do vale jusante incluindo diagnóstico das condições do uso e ocupação do solo e cadastro populacional
Estrutura e Governança	Participação das instituições nas reuniões de coordenação	Avaliar o nível de integração entre os agentes identificados na matriz de responsabilidades institucionais	Atas das reuniões e registros institucionais e comprovação de conhecimento do SIGBV pelas partes interessadas
Gestão Integrada de Riscos	Percentual de ações de tratamento dos riscos implementadas	Avaliar a efetividade do tratamento dos riscos identificados	Plano de tratamento dos riscos e registros de implementação
Gestão Integrada de Emergências	Percentual de treinamentos e exercícios realizados conforme planejamento	Avaliar o nível de preparação operacional do sistema	Plano anual de treinamentos e relatórios de exercícios
	Disponibilidade operacional e tempo de acionamento do sistema de aviso público	Garantir funcionamento do sistema de aviso público e avaliar a tempestividade da resposta à população potencialmente afetada	Registros do sistema de aviso público e comprovação da capacidade de respostas da população

Tabela 4 – Exemplos de indicadores de desempenho do SIGBV (continuação).

Componente	Indicador de desempenho	Finalidade	Fonte de evidência
Avaliação de Desempenho	Percentual de ações corretivas concluídas no prazo	Avaliar a eficácia do processo de melhoria contínua	Plano de ações corretivas e registros de acompanhamento

Os indicadores apresentados possuem caráter exemplificativo e não exaustivo. A definição dos indicadores, dos critérios de avaliação e das metas de desempenho deve considerar as características do empreendimento, os riscos identificados e os objetivos estabelecidos pelo SIGBV, permitindo o monitoramento sistemático da eficácia do sistema e subsidiando sua melhoria contínua.

4 CONCLUSÕES

Apesar dos avanços observados nos últimos anos, ainda persistem importantes lacunas relacionadas à gestão da segurança dos vales a jusante de barragens no Brasil. A evolução do arcabouço regulatório, as limitações estruturais de parte dos órgãos de proteção e defesa civil e a necessidade de fortalecimento da cultura de segurança evidenciam a importância de instrumentos que promovam maior integração entre os diversos agentes envolvidos na gestão de riscos e de emergências.

Este artigo não apresenta o texto normativo proposto, mas as premissas técnicas, os critérios de estruturação e os fundamentos conceituais que orientaram o desenvolvimento do Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens e Vales a Jusante (SIGBV), atualmente em elaboração no âmbito do Grupo de Trabalho 7 da Comissão de Estudos Especiais de Barragens (CEE-255) da ABNT.

A partir de conceitos consolidados de gestão de riscos, gestão de emergências e sistemas de gestão, foi possível estruturar uma proposta integrada capaz de organizar, em um único arcabouço, processos interdependentes relacionados à segurança da barragem e do vale a jusante. Essa estrutura busca promover maior coordenação institucional, fortalecer a governança colaborativa e proporcionar uma abordagem sistemática para prevenção, preparação, resposta e melhoria contínua da segurança.

Ao integrar a gestão da barragem e do vale a jusante em um único sistema, o SIGBV amplia o enfoque tradicional centrado na integridade estrutural da barragem, incorporando também aspectos territoriais, sociais, institucionais e operacionais. Dessa forma, a proposta estabelece uma base estruturada para organização dos processos de gestão, alinhada às melhores práticas nacionais e internacionais.

O processo de elaboração da futura norma técnica representa um importante avanço para a normalização da gestão integrada da segurança de barragens no Brasil. Uma vez concluído o processo de discussão técnica, consulta pública e aprovação no

âmbito da ABNT, espera-se que a norma constitua uma referência para empreendedores, órgãos públicos, entidades reguladoras e demais instituições envolvidas na gestão da segurança de barragens e dos vales a jusante.

Mais do que propor novos requisitos técnicos, as premissas apresentadas neste trabalho evidenciam a possibilidade de uma mudança de paradigma na gestão da segurança de barragens, ao demonstrar que a integração entre infraestrutura, território, instituições e comunidades pode ser organizada por meio de um sistema de gestão estruturado, orientado à melhoria contínua, à governança colaborativa e, sobretudo, à proteção da vida.

5 PALAVRAS-CHAVE

Segurança de Barragens, Gestão de Risco, Gestão de Emergência, Resiliência, Vale a Jusante, Sistema de Gestão

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MORAIS, Vitor Hugo Pereira de (2020) – “Sistema de gestão como instrumento de integração entre a segurança de barragens e vales a jusante”, UNICAMP - Campinas, SP.

[2] BRASIL. Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais.

[3] ABNT NBR ISO 31000 (2018). Associação Brasileira de Normas Técnicas. “Gestão de Riscos – Diretrizes”, Brasil.

[4] ABNT NBR ISO 22322 (2020). Associação Brasileira de Normas Técnicas. Segurança da sociedade – Gestão de emergências – Diretrizes para aviso público, Brasil.

[5] EN ISO 22300. Security and resilience – Vocabulary. European Standard. 51p. 2018

[6] ABNT NBR ISO 14001 (2015). Associação Brasileira de Normas Técnicas. Sistemas de Gestão Ambiental – Requisitos com orientações para uso.

[7] NBR ISO 26000. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Diretrizes sobre responsabilidade social. ISBN 978-85-07-02363-0. 110p. 2010.

	**Vitor Hugo Pereira de MORAIS** Engenheiro Civil pela UFMG. Doutorado em Segurança de Barragens e Mestrado em Engenharia Hidráulica pela UNICAMP e Pesquisador Colaborador da UNICAMP.
	**Alan Vaz LOPES** Engenheiro Civil pela UNB. Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela UNB. Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade da Califórnia, Berkeley. Especialista em Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas (ANA).

	**Othon José ROCHA** Engenheiro civil pela UFRJ com ênfase em Obras Hidráulicas. Mestrado em Segurança e Defesa Civil pela UFF.
	**Thiago Zenker GIRELI** Engenheiro Civil pela USP. Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária pela USP. Professor Livre Docente na UNICAMP no Departamento de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais.

SEISMIC HAZARD ASSESSMENT FOR DAM SAFETY AT THE SERRA DA MESA DAM, BRAZIL: A PROBABILISTIC AND DETERMINISTIC ANALYSIS

VILHENA, Ricardo M.
Geological Engineer - AXIA Energia
CONDORI, Cristóbal.
Geophysicist - GeosOndas Inovação Geofísica
RONDAN, Edgar R. S.
Physicist - GeosOndas Inovação Geofísica
DIOSES, Marcela J.
Geophysicist - GeosOndas Inovação Geofísica
VIANNA, Vinícius F.
Geological Engineer - AXIA Energia

ABSTRACT

Seismic hazard assessment in Stable Continental Regions (SCRs) is challenging due to low seismicity rates, long recurrence intervals, and limited historical and instrumental records, which increase epistemic uncertainty. Nevertheless, reliable hazard evaluation is essential for critical infrastructure, where low-probability but high-impact earthquakes may pose significant risks. This study presents a probabilistic and deterministic seismic hazard assessment for the Serra da Mesa Hydroelectric Dam, located in central Brazil within the South American Platform. The analysis integrates updated historical and instrumental seismic catalogs, neotectonic and tectonic information, seismogenic source zones, and ground-motion attenuation relationships suitable for intraplate environments. The site lies between the São Francisco Craton and the Transbrasiliano Lineament, a major lithospheric discontinuity controlling regional seismicity. Probabilistic results indicate peak ground acceleration (PGA) values of 0.115 g and 0.201 g for probabilities of exceedance of 10% and 2% in 50 years, corresponding to return periods of approximately 475 and 2,475 years, respectively. Deterministic scenarios show that earthquakes greater than Mw 4.0 within 100 km dominate the site hazard. The consistency between probabilistic and deterministic results supports the robustness of the hazard characterization. Overall, the results indicate low-to-moderate seismic hazard, while emphasizing the relevance of the 2% in 50 years scenario for safety evaluation of high-consequence dams. This study provides technical input for seismic design, dam safety assessment, and long-term risk management of Serra da Mesa and similar infrastructure in SCRs.

RESUMO

A avaliação do perigo sísmico em Regiões Continentais Estáveis (SCR) é desafiadora devido às baixas taxas de sismicidade, aos longos intervalos de recorrência e à limitada disponibilidade de registros históricos e instrumentais, fatores que aumentam

as incertezas da modelagem. Ainda assim, essa avaliação é essencial em regiões com infraestruturas críticas, onde terremotos de baixa probabilidade e alto impacto podem representar riscos significativos. Este estudo apresenta uma análise probabilística e determinística da ameaça sísmica da UHE Serra da Mesa, localizada na região central do Brasil, na Plataforma Sul-Americana. A análise integra catálogos sísmicos históricos e instrumentais atualizados, informações neotectônicas e tectônicas, zonas sismogênicas e relações de atenuação do movimento do solo adequadas a ambientes intraplaca. A área situa-se entre o Cráton do São Francisco e o Lineamento Transbrasiliano, importante descontinuidade litosférica associada à sismicidade regional. Os resultados probabilísticos indicaram acelerações máximas do solo (PGA) de 0,115 g e 0,201 g para probabilidades de excedência de 10% e 2% em 50 anos, correspondentes a períodos de retorno de aproximadamente 475 e 2.475 anos. Os cenários determinísticos indicam que terremotos com magnitudes superiores a Mw 4,0, em até 100 km, dominam a ameaça sísmica local. A consistência entre os resultados probabilísticos e determinísticos reforça a robustez da caracterização da ameaça. De modo geral, os resultados indicam ameaça sísmica baixa a moderada, destacando a relevância do cenário de 2% em 50 anos para a avaliação da segurança de barragens de alto potencial de dano. O estudo fornece subsídios técnicos para o projeto sísmico, a avaliação de segurança e a gestão de risco da Barragem de Serra da Mesa e de infraestruturas similares em regiões continentais estáveis.

1. INTRODUCTION

Large storage dams are exposed to significant natural hazards, particularly earthquakes and floods. In Stable Continental Regions (SCRs), such as the interior of the South American Platform, seismic hazard assessment is especially challenging due to low seismicity rates, diffuse earthquake occurrence, long recurrence intervals, and limited historical and instrumental records [1]. Although seismic activity in these regions is relatively low, damaging intraplate earthquakes remain possible and may represent considerable risk for critical infrastructure such as hydroelectric dams [2,3].

In Brazil, seismic analyses for dams have historically relied on simplified pseudo-static approaches based on constant seismic coefficients proposed by Eletrobras (2003) [4]. These methods, originally derived from earlier engineering frameworks [7,8], neglect important aspects of the dynamic response of dam structures and do not adequately represent site-specific seismic hazard conditions [1]. Modern seismic engineering practice instead recommends the use of Seismic Hazard Analysis (SHA), integrating regional tectonics, historical and instrumental seismicity, seismogenic source characterization, and ground-motion prediction models [9].

Current Brazilian standards, including ABNT NBR 15421/2023 and ABNT NBR 13028-2/2025 [5,6], together with international guidelines from the International Commission on Large Dams, Canadian Dam Association, Federal Emergency Management Agency, and United States Army Corps of Engineers, recommend more rigorous approaches based on deterministic and probabilistic seismic hazard assessments. The combined application of Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA) and

Classificação: Setorial

Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) provides a comprehensive framework for evaluating both extreme seismic scenarios and long-term hazard recurrence. Although Brazil is located within a stable continental region, moderate intraplate earthquakes have been historically recorded, with events reaching magnitudes up to mb 6.2 and intensities between V and VII on the Modified Mercalli scale [10–18]. Recent regional studies have also indicated peak ground acceleration (PGA) values higher than those adopted in older Brazilian design criteria, suggesting that seismic hazard in some areas may be underestimated [19–25].

The Serra da Mesa Hydroelectric Dam, located in central Brazil and operated by AXIA Energia and CPFL Energia, represents an important case study for seismic hazard evaluation in intraplate environments. The reservoir has been monitored by local seismographic networks since impoundment in 1996, including recent modernization with accelerographic instrumentation for engineering applications. Currently, four seismic monitoring stations operate in the study area (Figure 1).



Figure 1. Map showing the location of the Serra da Mesa Hydroelectric Dam. Triangles indicate seismic stations.

This study presents a site-specific seismic hazard assessment for the Serra da Mesa Dam using integrated deterministic and probabilistic approaches. Seismogenic sources are characterized, recurrence parameters are estimated through Gutenberg–Richter relationships, and appropriate attenuation models for stable continental regions are applied. The results are expressed through seismic hazard curves and Uniform Hazard Spectra (UHS), supporting the evaluation of the Operating Basis Earthquake (OBE) and Maximum Credible Earthquake (MCE) in accordance with international recommendations [2,3,26].

1.1 Seismotectonic and seismicity setting

Classificação: Setorial

The study area is located between the São Francisco Craton and the Transbrasiliano Lineament (LTB), a major lithospheric discontinuity recognized as an important regional structural feature and potential seismic source. Although regional seismicity is generally low, intraplate earthquakes demonstrate that central Brazil is not free from seismic hazard [27].

The Serra da Mesa Dam is founded on a granitic batholith composed of competent massive granite with high bearing capacity. No major regional faults cross the dam foundation; however, NE–SW thrust faults occur within the reservoir area approximately 30–60 km from the site [28].

Historical and instrumental seismic records from the University of Brasília Seismological Observatory and local monitoring stations identified 37 earthquakes with magnitudes between 1.1 and 3.7 within 200 km of the dam site during the period 1970–1994 [28]. Updated regional interpretations indicate that the Transbrasiliano Lineament may generate earthquakes up to approximately Mw 4.8, while events up to Mw 5.5 are considered plausible but low-probability scenarios for seismic hazard assessment purposes [27,28].

1.2 Reservoir-induced seismicity

Shortly after the impoundment of the Serra da Mesa reservoir, a seismic event of magnitude mD 1.9 was recorded on November 18, 1996, within the reservoir influence area. According to the University of Brasília Seismological Observatory, 34 seismic events were identified as reservoir-induced between 1996 and 2003, corresponding to an average of approximately five events per year [29].

Seismic activity increased during the first years after impoundment, with the largest recorded event reaching magnitude mD 2.8 in July 2003 [29]. Although reservoir-induced seismicity was observed, the recorded magnitudes remained low and did not represent a structural threat to the dam [10,25].

Recent monitoring indicates that no significant reservoir-induced seismicity has been identified in the Serra da Mesa area since 2020, with current activity dominated by low-magnitude natural and artificial events. The estimated Gutenberg–Richter b-value of 1.55 for the induced sequence further supports its reservoir-induced origin, as such sequences are typically characterized by a higher proportion of small-magnitude event

2. DATA AND METHODOLOGY

2.1 Data

The seismic dataset used in this study was compiled from the earthquake catalog maintained by the Seismology Center of the University of São Paulo, which integrates both historical and instrumental seismicity records for the period 1826–2025. The

Classificação: Setorial

catalog is publicly available through the Seismological Bulletin portal (https://www.sismo.iag.usp.br/eq/bulletin/)[30]. To complement and update this database, additional seismic bulletins from the Brazilian Seismic Network (RSBR) were incorporated. The RSBR provides continuous and standardized seismic monitoring through a nationwide network of broadband stations [31, 21]. Furthermore, data recorded by all four companies' seismic stations were included, enabling further refinement and updating of the seismic database used in this study (Figure 2).

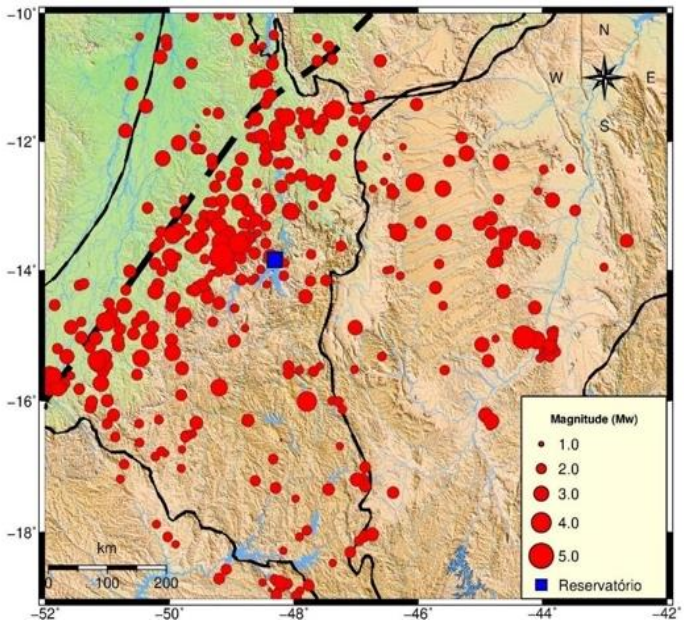


Figure 2. Seismicity map of the Serra da Mesa Hydroelectric Plant region (blue square) for the period 1826–2025 and the main tectonic units of Brazil (Source: Brazilian Seismic Catalog).

Given that the original seismic catalog included different magnitude scales (mb and mR), all events were homogenized to moment magnitude (Mw), which is the standard scale adopted in the attenuation relationships and PSHA calculations. The conversion followed the empirical relationship proposed by Assumpção (2022) [32], while mb and mR were considered equivalent for moderate magnitudes [33].

To ensure statistical consistency, dependent events were removed using the Gardner and Knopoff (1974) declustering method implemented in the ZMAP environment [34]. This procedure eliminates foreshocks and aftershocks through magnitude-dependent temporal and spatial windows, resulting in a catalog consistent with the Poisson occurrence model adopted in the probabilistic seismic hazard analysis.

2.2 Methodology

2.2.1 Seismic hazard

Seismic hazard represents the potential for earthquake-induced ground motion at a given site and is a fundamental component of earthquake engineering and structural

Classificação: Setorial

safety assessments [35]. Seismic hazard is commonly evaluated using two complementary approaches: Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA), based on maximum credible earthquake scenarios [36], and Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), which incorporates uncertainties in earthquake magnitude, location, and recurrence to estimate the probability of exceeding specific ground-motion levels over a given time period [37].

PSHA results are generally expressed through seismic hazard curves relating ground-motion parameters, such as Peak Ground Acceleration (PGA), to annual probabilities of exceedance and return periods [38]. The assessment integrates historical and instrumental seismic catalogs, seismogenic source characterization, frequency–magnitude relationships, and ground-motion prediction equations (GMPEs) within deterministic and probabilistic frameworks to generate hazard curves and Uniform Hazard Spectra (UHS) for engineering applications [35,37,39].

To model earthquake occurrence in time, a Poisson process is assumed due to its suitability for regions with limited seismic data availability [35]. Under this assumption, the seismic hazard curve is expressed as:

$$\text{Ph (y)} = 1 - exp(\sum_{i=1}^{n_s} \quad \sum_{k=1}^{N_M} \quad \sum_{l=1}^{N_R} \quad - t \cdot \nu_i \cdot P[Y > y\, M_k, R_l] \cdot f_R(R_l) \cdot f_M(M_k)) \tag{1}$$

where the equation is solved numerically through the discretization of magnitude and distance intervals. The resulting hazard curves indicate that higher ground-motion levels are associated with lower probabilities of exceedance and longer return periods.

2.2.2 Ground motion prediction equations

Ground-motion prediction equations (GMPEs), also known as attenuation models, are used to estimate seismic ground motion as a function of earthquake magnitude, source-to-site distance, and local site conditions [40]. Owing to the limited availability of strong-motion records in Brazil, seismic hazard studies commonly adopt GMPEs developed for tectonically analogous Stable Continental Regions, particularly eastern North America. The models evaluated in this study included Campbell (2003) [42], Toro et al. (1997, 2002) [41,43], Tavakoli and Pezeshk (2005) [44], Atkinson and Boore (2006) [45], Atkinson (2008) [46], Pezeshk et al. (2011) [47], Bindi et al. (2011) [48], and Yenier and Atkinson (2015) [49].

Based on their performance in intraplate environments and compatibility with the regional seismic dataset, the GMPEs of G. R. Toro et al. (1997, 2002) [41,43] and Domenico Bindi et al. (2011) [48] were selected for the final hazard assessment. To incorporate epistemic uncertainty, a logic-tree approach was implemented, assigning weights of 0.75 to the Bindi model and 0.25 to the Toro model according to their relative fit to the regional seismic data (Figure 3).

Classificação: Setorial

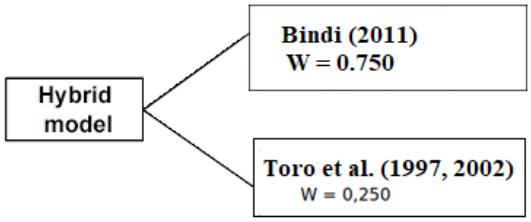


Figure 3. Logical model for processing seismic risk data in the study area.

The attenuation relationship proposed by G. R. Toro et al. (1997, 2002) [41, 43] is one of the most widely applied GMPEs for seismic hazard assessment in Brazil, particularly in stable continental regions. The model estimates ground-motion parameters as a function of magnitude and Joyner–Boore distance and incorporates both aleatory variability and epistemic uncertainty:

$$lnY = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 ln(R_M) - (C_5 - C_4) max[ln(\frac{R_M}{100}),0] - C_6 R_M + \varepsilon_e + \varepsilon_a$$

$$R_M = \sqrt{R_{jb}^2 + C_7^2} \qquad (2)$$

where Yrepresents the ground-motion parameter (e.g., PGA), $M$is the moment magnitude (M_w), $R_{jb}$is the Joyner–Boore distance, and C_1–C_7 are empirical coefficients.

Additionally, the GMPE proposed by Domenico Bindi et al. (2011) [48] was considered due to its suitability for intraplate tectonic environments. This model is based on empirical regression of strong-motion records and is expressed as:

$$lnY = a + b * M - c * ln(\sqrt{R_{jb}^2 + h^2}) + d * S_{type} + \sigma \quad (3)$$

where $Y$is the ground-motion parameter, $M$is the moment magnitude, $R_{jb}$is the Joyner–Boore distance, $h$is a distance-scaling parameter, and S_{type}represents local site conditions. The coefficients were adopted from the original formulations of each model.

2.3 Data processing

Preparation of the seismic catalog is a fundamental step in probabilistic seismic hazard assessment, as the reliability of recurrence models depends directly on the quality and consistency of the earthquake database. Initially, all available magnitudes were homogenized to moment magnitude (Mw) to ensure compatibility among different datasets and recording periods. Subsequently, the catalog was declustered using the algorithm implemented in the ZMAP software, allowing the identification and removal of dependent events such as foreshocks and aftershocks. This procedure ensures that the final catalog represents independent seismicity, which is a key requirement for probabilistic analyses based on Poissonian earthquake occurrence models and

Classificação: Setorial

enables more robust estimation of seismic hazard for engineering applications (Figure 4).

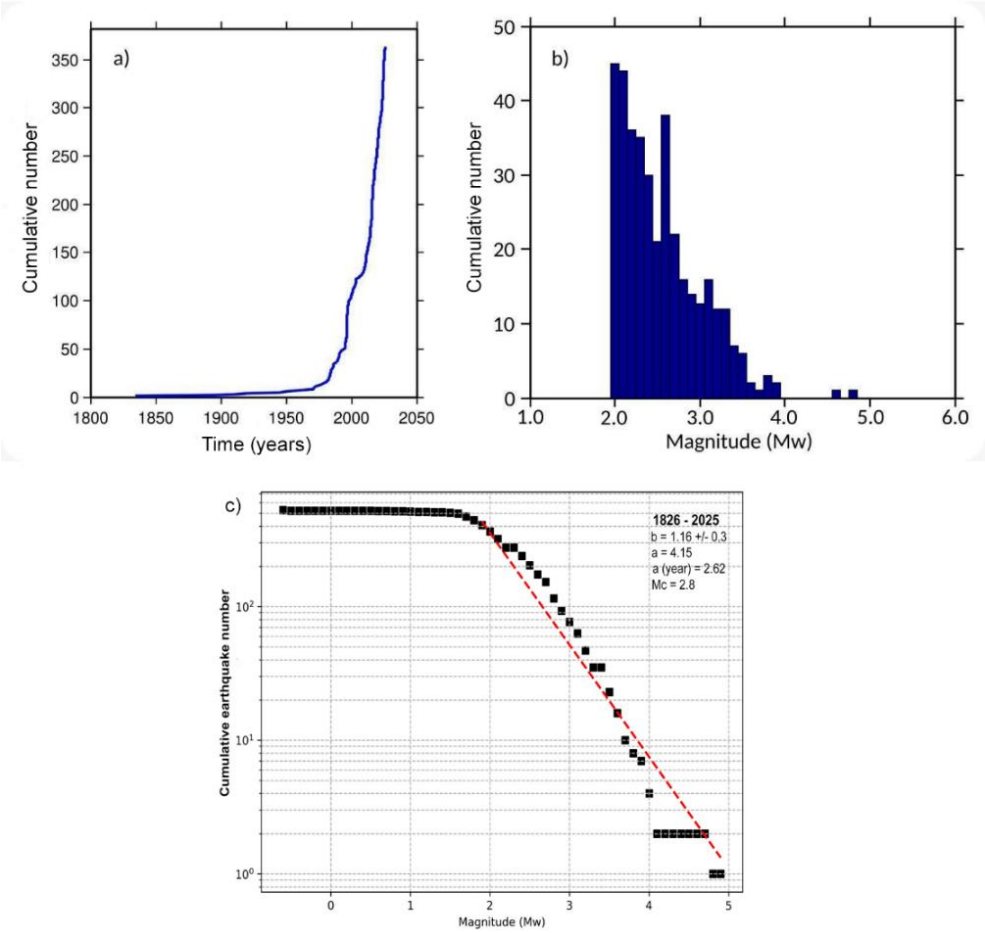


Figure 4. a) Temporal distribution of seismic events considered in the seismic catalog for the period 1826 to 2025 used in this study, **b)** Histogram of earthquake frequency as a function of magnitude, and **c)** Frequency–magnitude distribution of the seismic catalog used in this study.

Seismogenic sources were defined through the integration of geological, tectonic, and seismological information, considering regions with similar seismic characteristics and homogeneous seismic potential [36,50]. Based on the spatial distribution of seismicity and major tectonic structures, six crustal seismogenic sources associated with regional fault systems and crustal deformation patterns were identified within the study area (Figure 5).

For each source, the magnitude of completeness (Mc) was estimated using the Maximum Curvature method, and the Gutenberg–Richter parameters $a$and $b$were calculated (Table 1). These parameters were subsequently implemented in the R-CRISIS software [51] to perform the probabilistic seismic hazard analysis and estimate ground-motion exceedance probabilities and peak ground acceleration values for the study area.

Classificação: Setorial

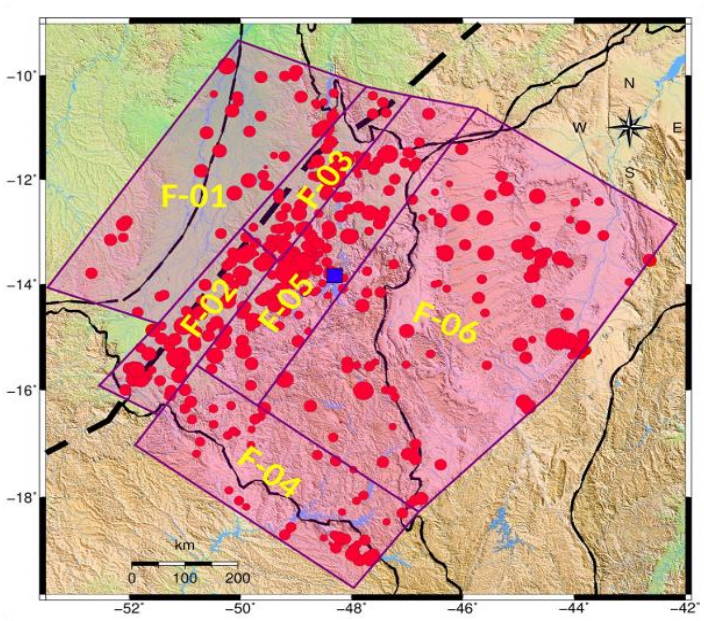


Figure 5. Distribution and geometry of seismic sources. The blue square represents the Serra da Mesa Hydroelectric Plant (UHE Serra da Mesa).

Table 1. Seismological parameters of the seismogenic sources defined in this study.

SOURCE	Mw					
	Mmin	Mmax	b	a	λ	β
F-1	2.8	3.6	1.16	4.15	0.236	2.671
F-2	2.6	3.8	0.895	3.88	0.764	2.061
F-3	2.0	3.5	0.714	2.96	0.565	1.644
F-4	2.0	3.2	1.1	3.58	0.229	2.533
F-5	1.9	4.8	0.689	3.36	0.564	1.586
F-6	1.8	4.6	0.729	3.33	0.809	1.679

3. RESULTS

3.1 Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA)

Figures 6 and 7 present the spatial distribution of peak ground acceleration (PGA) for two seismic hazard scenarios corresponding to probabilities of exceedance of 10% and 2% in 50 years (approximately 475- and 2475-year return periods, respectively). For the 10% in 50 years scenario, the highest PGA values exceed 0.10 g and are concentrated in the dam site and its vicinity, reflecting the combined effects of nearby seismic sources, source-to-site distances, recurrence parameters, and the adopted ground-motion models. The maximum estimated PGA for this scenario is 0.115 g, consistent with a low-to-moderate seismic hazard environment typical of intraplate regions.

Under the more severe 2% in 50 years scenario, the spatial pattern remains similar but

Classificação: Setorial

with a marked increase in ground motion intensity. The maximum PGA rises to 0.201 g, indicating a substantial escalation in seismic demand under rare but plausible events. Overall, both scenarios show that while the region is characterized by relatively low seismicity rates, it retains the potential for significant ground shaking, particularly under long-return-period events.

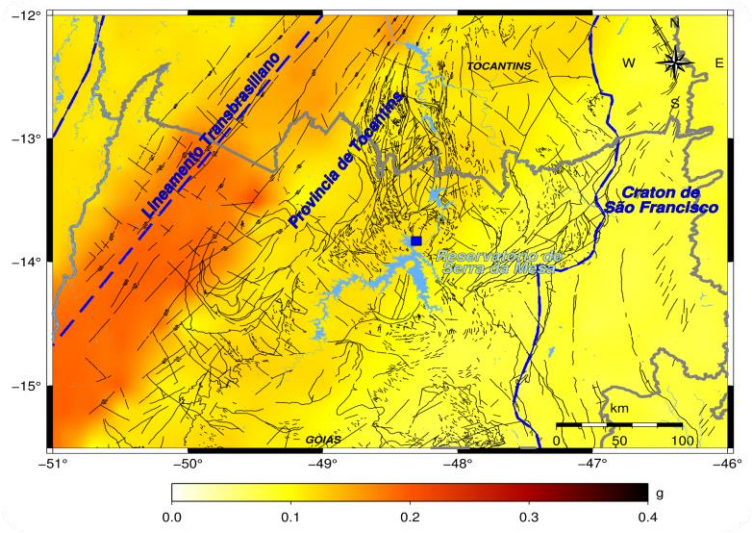


Figure 6. Probabilistic seismic map for 10% probability of exceedance in 50 years (approximate return period of 475 years).

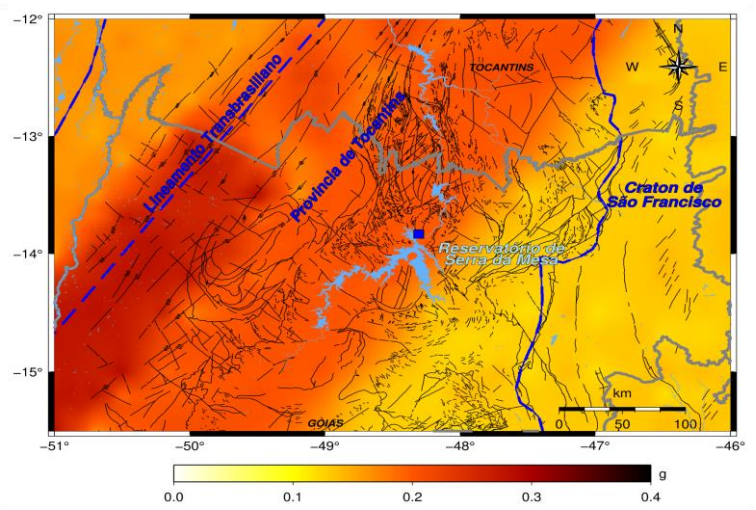


Figure 7. Probabilistic seismic map for 2% probability of exceedance in 50 years (approximate return period of 2475 years).

3.2 Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA)

Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA) was conducted by identifying the relevant seismogenic sources, defining the minimum source-to-site distances, and selecting the controlling earthquake, i.e., the event that produces the maximum ground motion as a function of magnitude and distance. Seismic demand was expressed in

Classificação: Setorial

terms of peak ground acceleration (PGA), estimated using ground motion prediction equations (GMPEs) [35].

The Serra da Mesa Hydroelectric Power Plant is situated in a region characterized by low-to-moderate seismicity, where both natural tectonic earthquakes and reservoir-induced seismicity have been documented [52, 53]. The analysis considered the most significant events recorded in the regional seismic catalog. Local magnitudes (mR) were converted to moment magnitude (Mw) using the empirical relationship proposed by Assumpção et al. (2022) [32]. Subsequently, PGA values were estimated using the attenuation models of Toro et al. (1997, 2002) and Bindi et al. (2011). Table 2 summarizes the principal seismic events considered in the deterministic analysis, including their magnitude, source-to-site distance, and the corresponding PGA estimates obtained from both attenuation models.

Table 2. Peak ground acceleration (PGA) estimated using deterministic analysis.

Date	Magnitude (Mw)	Distance (R), km	Attenuation Model	PGA (g)
20/11/2000	3.9	245.17	Bindi et al. (2011)	0.00223
			Toro et al. (1997, 2002)	0.00107
8/10/2010	4.8	92.93	Bindi et al. (2011)	0.01810
			Toro et al. (1997, 2002)	0.01140
8/01/2011	3.8	70.09	Bindi et al. (2011)	0.00437
			Toro et al. (1997, 2002)	0.00777
19/07/2012	3.7	352.01	Bindi et al. (2011)	0.00031
			Toro et al. (1997, 2002)	0.00046

The results indicate that the highest PGA values are associated with the October 8, 2010 event (Mw 4.8), located approximately 93 km from the site. For this earthquake, the estimated PGA ranges from 0.011 g (Toro et al., 1997, 2002) to 0.018 g (Bindi, 2011). Overall, the deterministic estimates remain below 0.02 g, consistent with the low seismic activity typical of stable intraplate regions.

A complementary deterministic scenario should be considered in future work using a plausible Mw 5.0–5.5 earthquake located at the minimum relevant source-to-site distance associated with the controlling seismogenic structure.

Figure 8 presents the PGA estimates obtained from both attenuation models for the controlling earthquake scenario. The results exhibit a narrow and consistent range, between approximately 0.01 g and 0.02 g, confirming the limited seismic demand at the site under deterministic conditions.

Classificação: Setorial

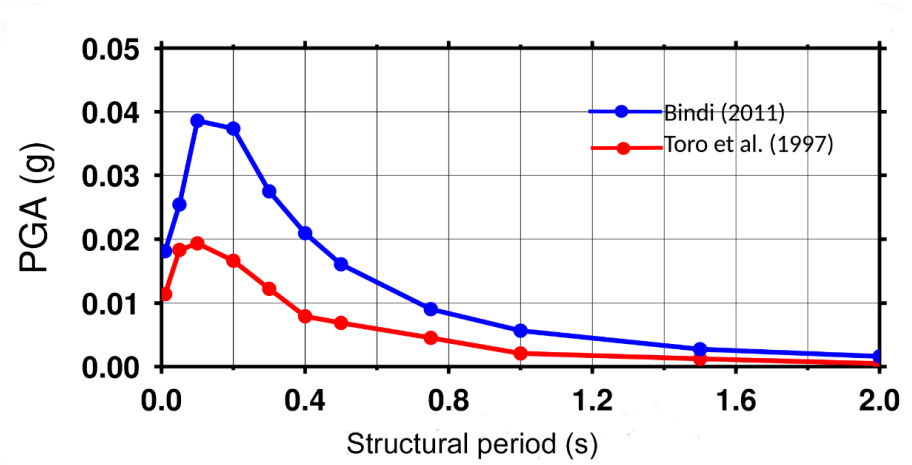


Figure 8. Deterministic PGA estimates for the controlling Mw 4.8 event located 92.93 km from the dam, obtained using the selected ground-motion prediction equations.

4. DISCUSSION

A comparison with previous studies indicates that peak ground acceleration (PGA) values for the Serra da Mesa Hydroelectric Dam have been reported in the range of 0.16 to 0.24 g for a 2% probability of exceedance in 50 years [54], whereas the results obtained in this study vary between 0.167 and 0.201 g. Overall, both assessments show good agreement, although regional-scale models tend to slightly overestimate seismic hazard in low-seismicity intraplate environments (Figure 9).

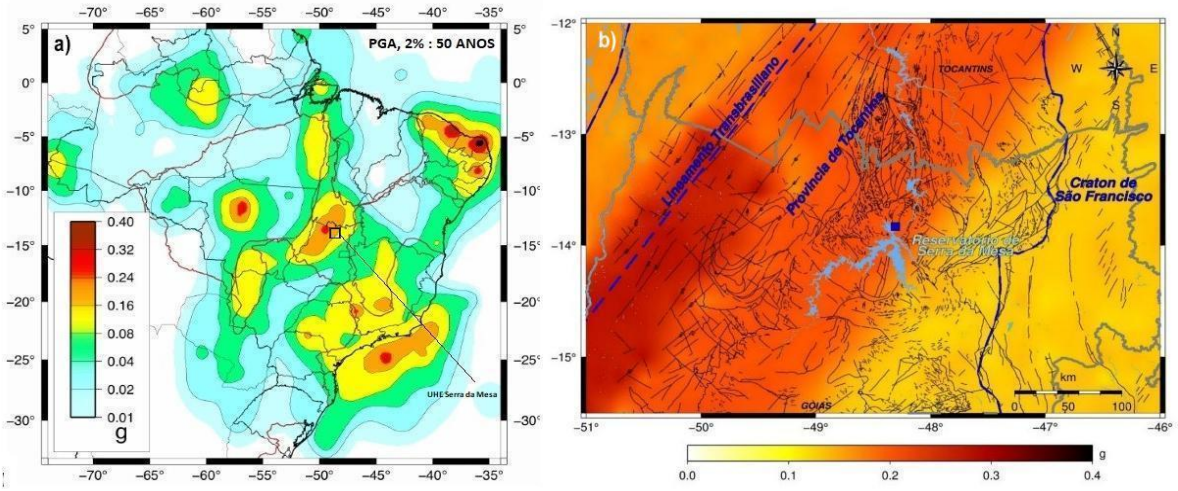


Figure 9. Seismic hazard maps in terms of peak ground acceleration (PGA) for a 2% probability of exceedance in 50 years: (a) regional hazard map [23] and (b) site-specific hazard map (this study).

Classificação: Setorial

These differences are mainly associated with the use of generalized ground-motion prediction equations (GMPEs) and regional seismic source models, which may not fully represent local site conditions and intraplate seismicity characteristics. Therefore, the integration of site-specific geological and seismic information is essential to reduce epistemic uncertainty and improve hazard estimates.

Although Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) provides a robust framework for seismic assessment, its application in stable continental regions may produce conservative results when local calibration is limited. In this study, due to the absence of strong-motion recordings, the hazard assessment was based on GMPEs and probabilistic approaches without recorded accelerograms. Figure 10 presents the Uniform Hazard Spectra (UHS) derived from the probabilistic analysis, which define the seismic demand adopted for structural evaluations under site-specific conditions.

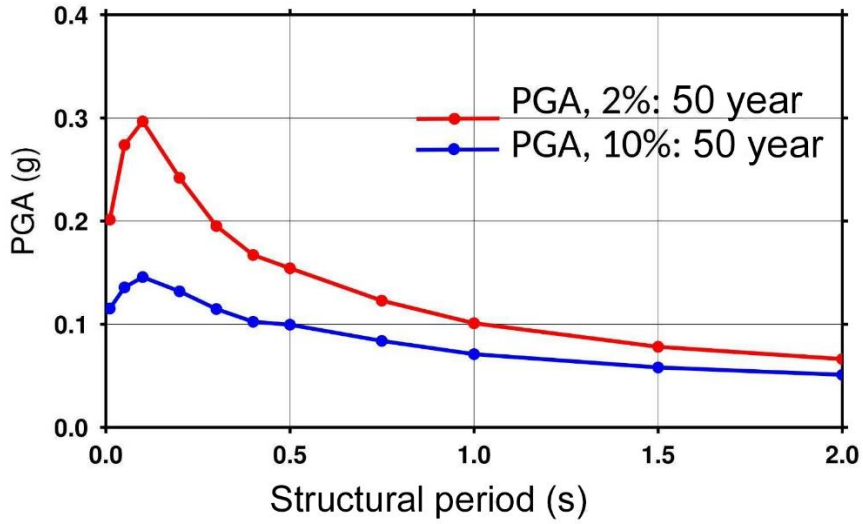


Figure 10. Uniform seismic hazard spectrum (UHS) obtained by probabilistic analysis, for exceedance probabilities of 2% and 10% in 50 years (approximate return periods of 2475 and 475 years, respectively).

The executive design of the Serra da Mesa Hydroelectric Dam by IESA [28] included static and pseudo-static stability analyses calibrated using geotechnical and field monitoring data obtained during construction. Shear strength parameters, pore-pressure measurements, and material unit weights were refined through laboratory testing and in situ instrumentation. Seismic loading for the pseudo-static analyses was based on records from a local seismological station installed by FURNAS in 1989, leading to the adoption of a magnitude 4.0 earthquake as a conservative deterministic scenario for slope stability evaluations [28].

The comparison between the executive pseudo-static design criteria and the updated PSHA/DSHA results (Table 3) provides important insights for dam safety management. The design adopted conservative pseudo-static coefficients (kh = 0.05 g, 0.08 g, and 0.10 g) for the regional seismic context, and the corresponding stability analyses produced safety factors above the minimum acceptable limits [28].

Classificação: Setorial

Table 3. Comparison between the executive pseudostatic design criteria and the updated PSHA/DSHA results.

Seismic Type	Period	Annual Exceedance Probability	PGA (g)	Pseudo static criteria (g)	Pseudo static criteria – Eletrobras [4]	Pseudo static criteria IESA [28]	Modified Mercalli Intensity / Distance IESA [28]
OBE (PSHA)	475 years	10% in 50 years	0.115	K_h: 0.06	K_h: 0.05	K_h: 0.08	6.6 / 50 km
				K_v: 0.04	K_v: 0.03	K_v: 0.05	
SEE / MCE (PSHA)	2475 years	2% in 50 years	0.201	K_h: 0.10	K_h: 0.05	K_h: 0.10	5.0 / 13 km
				K_v: 0.07	K_v: 0.03	K_v: 0.07	

Note: The pseudostatic coefficients estimated from the PSHA results were approximated using kh ≈ 0.5 PGA and kv ≈ 2/3 kh, consistent with simplified pseudostatic screening practice. These coefficients should not be interpreted as direct substitutes for dynamic seismic demand parameters.

The results highlight that seismic hazard in Brazil should be considered a low-probability but non-negligible issue for critical infrastructure. Although the Serra da Mesa region presents relatively low seismicity, regional tectonic structures, reservoir-induced seismicity, and the possibility of moderate intraplate earthquakes justify the application of site-specific analyses.

The study also shows that simplified pseudo-static approaches based only on seismic coefficients are insufficient for modern dam safety evaluations. Seismic demand should be characterized using hazard curves, response spectra, and ground-motion parameters derived from integrated PSHA and DSHA methodologies, since dam response depends on the dynamic interaction between the structure, foundation, and reservoir system.

The recent installation of the accelerographic station represents an important advancement for future safety assessments, allowing direct ground-motion measurements and supporting the calibration of dynamic analyses under OBE and Safety Evaluation Earthquake (SEE) conditions.

Overall, the available evidence does not indicate seismic demand capable of compromising the global stability of the Serra da Mesa Dam. Nevertheless, the updated hazard assessment provides a more robust basis for risk-informed dam safety management and may support similar PSHA/DSHA applications for other Brazilian hydropower dams [1,55].

5. CONCLUSIONS

This study presented a combined probabilistic and deterministic seismic hazard assessment for the Serra da Mesa Hydroelectric Dam, located in a stable intraplate region of central Brazil.

Classificação: Setorial

The study area is located within the central South American Platform, a stable intraplate tectonic setting bounded by the São Francisco Craton and the Transbrasiliano Lineament. This geological context is characterized by low seismicity rates and predominantly low-magnitude, sparsely distributed events, supporting an overall classification of low regional seismic hazard. Nevertheless, the Transbrasiliano Lineament plays a fundamental role as a major seismogenic structure, capable of generating earthquakes up to approximately Mw 4.8, indicating that regional seismicity is mainly driven by the reactivation of pre-existing crustal faults.

Reservoir-induced seismicity was identified after initial impoundment, with 34 induced events between 1996 and 2003 and a maximum magnitude of mD 2.8. However, recent monitoring indicates no relevant reservoir-induced seismicity since 2020.

The PSHA results yielded peak ground acceleration (PGA) values of 0.115 g for the OBE level and 0.201 g for the SEE/MCE level, corresponding to probabilities of exceedance of 10% and 2% in 50 years, respectively, and approximate return periods of 475 and 2,475 years. These values are representative of intraplate tectonic settings, where generally low seismic activity may still produce significant ground motions under rare, high-impact events. The spatial distribution of PGA highlights the combined influence of regional seismic sources and local site effects.

From an engineering perspective, the results indicate a low-to-moderate seismic hazard level. However, the adoption of the 2% probability of exceedance in 50 years, typically associated with the Safety Evaluation Earthquake, is essential for assessing the structural safety and global stability of high-consequence infrastructure such as large dams.

The executive executive design adopted conservative pseudo-static coefficients (kh = 0.05–0.10 g), resulting in safety factors above the minimum required limits. Although the current results do not indicate seismic demand capable of compromising global stability, the updated PGA estimates should be incorporated into future dynamic analyses, including response spectra and performance-based stability evaluations. In this context, the recent installation of an accelerographic station at the dam site represents an important step toward reducing uncertainties in future seismic assessments.

6. KEYWORDS

Seismic hazard assessment; Intraplate earthquakes; PGA; Dam safety; Brazil.

7. REFERENCES

[1] HINKS, J. (Ed.) - Institution of Civil Engineers (ICE) (2023). Earthquake Engineering for Dams and Reservoirs. Emerald Group Publishing.

[2] ICOLD (2016) – “Selecting Seismic Parameters for Large Dams”, Bulletin 148, International Commission on Large Dams, Paris, France.

Classificação: Setorial

[3] USACE (2007) – “Earthquake Design and Evaluation of Concrete Hydraulic Structures”, Engineer Manual EM 1110-2-6053, U.S. Army Corps of Engineers, USA.

[4] ELETROBRÁS (2003). Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Rio de Janeiro, Brazil.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2023) – NBR 15421: Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento, Rio de Janeiro, Brazil.

[6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2025) – NBR 13028-2: Elaboração, apresentação de projeto e avaliação de segurança de estruturas para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Parte 2: Requisitos, Rio de Janeiro, Brazil.

[7] ZANGAR, C. N. (1952) Hydrodynamic Pressures on Dams Due to Horizontal Earthquake Effects. Bureau of Reclamation, US Department of Interior, USA.

[8] SHANNON & WILSON, INC.; AGBABIAN ASSOCIATES. (1979) Statistical Analysis of Earthquake Ground Motion Parameters. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., USA.

[9] KIJKO, A. (2011) – “Seismic hazard assessment: Theory and practice”, in Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, Springer, Germany.

[10] BARROS, L. V., ASSUMPÇÃO, M., QUINTERO, R. & CAIXETA, D. F. (2009) – “The 1955 Central Brazil earthquake revisited”, seismic analysis of historical earthquake, 27(2–3), Netherlands.

[11] ASSUMPÇÃO, M. et al. (2014) – “Intraplate earthquakes”, Cambridge University Press proceedings, intraplate seismicity, United Kingdom.

[12] WOOD, H. O. & NEUMANN, F. (1931) – “Modified Mercalli Intensity Scale of 1931”, Bulletin of the Seismological Society of America, 21, seismic intensity scale, 21, USA.

[13] ASSUMPÇÃO, M.; SUÁREZ, G.; VELOSO, J. A. V. (1985) – “Intraplate seismicity in Brazil”, Earthquake Notes, intraplate seismicity, 56(3), USA.

[14] FERREIRA, J. M.; COSTA, J. M. (1987) – “Seismic activity in northeastern Brazil”, Revista Brasileira de Geofísica, crustal seismicity, 5(2), Brazil.

[15] TAKEYA, M. K.; FERREIRA, J. M.; ASSUMPÇÃO, M. (1989) – “Seismicity of northeastern Brazil”, Revista Brasileira de Geofísica, regional seismicity, 7(1–2), Brazil.

[16] FERREIRA, J. M.; OLIVEIRA, R. T.; TAKEYA, M. K. (1998) – “Seismic swarms in northeastern Brazil”, Annali di Geofisica, seismic swarms, 41(5–6), Italy.

Classificação: Setorial

[17] BEZERRA, F. H. R.; FERREIRA, J. M.; SOUSA, M. O. L.; NASCIMENTO, A. F.; SÁ, J. M. (2007) – "Historical seismicity in northeastern Brazil", Journal of Seismology, historical seismicity, 11, Netherlands.

[18] VELOSO, J. A. V. (2011) – "Seismic hazard in northeastern Brazil", Brazilian Journal of Geophysics, seismic hazard analysis, 29(1), Brazil.

[19] GIARDINI, D. et al. (1999) – "Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)", Annali di Geofisica, global seismic hazard, 42(6), Italy.

[20] PETERSEN, M. D. et al. (2018) – "2018 update of the US National Seismic Hazard Model", Earthquake Spectra, seismic hazard model, 34(1), USA.

[21] COSTA, C.; ASSUMPÇÃO, M.; NASCIMENTO, A. (2020) – "Probabilistic seismic hazard assessment for South America", Journal of Seismology, seismic hazard assessment, 24, Netherlands.

[22] PAGANI, M. et al. (2020) – "The 2018 Global Earthquake Model seismic hazard map", Earthquake Spectra, global seismic hazard model, 36(S1), USA.

[23] ASSUMPÇÃO, M. et al. (2016) – "Preliminary seismic hazard map of Brazil", Seismological Research Letters, seismic hazard mapping, 87(2A), USA.

[24] BIANCHI, M. B. et al. (2018) – "The Brazilian Seismographic Network (RSBR): Improving Seismic Monitoring in Brazil", Seismological Research Letters proceedings, seismic network development, USA.

[25] MIRANDA, J. M. (2023) – "Seismic hazard and risk in Brazil: Current challenges", Brazilian Journal of Geophysics, seismic risk analysis, 41(1), Brazil.

[26] NEHRP (2020) – "Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures", FEMA P-2082, seismic design provisions, USA.

[27] PIRCHINER, M.; DROUET, S.; ASSUMPÇÃO, M. et al. (2015) – "PSHAB: Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Brazil: A National Hazard Map Building Effort", Proceedings of the 26th IUGG General Assembly, Prague, Czech Republic; and related updated regional interpretation used in this study.

[28] IESA – INTERNACIONAL DE ENGENHARIA S.A. (1995) – Aproveitamento Hidrelétrico de Serra da Mesa, Projeto Executivo, Análise de Estabilidade Estática e Pseudo-estática da Barragem, RGE-443, Brazil.

[29] OBSERVATÓRIO SISMOLÓGICO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (2004) – Relatório Consolidado n. 13423: A Sismicidade Associada ao Reservatório Hidrelétrico de Serra da Mesa/GO no Período 1996–2003 (Sinopse), Brasília, Brazil.

Classificação: Setorial

[30] UNIVERSITY OF SÃO PAULO (USP – IAG) (s.d.) – “Brazilian Seismic Catalog / Seismic Bulletin”, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, catálogo sísmico nacional, Brasil.

[31] BIANCHI, M. et al. (2012) – “The Brazilian Seismographic Network: Historical Overview and Current Status”, Bulletin of the International Seismological Centre proceedings, seismic monitoring systems, Thatcham, United Kingdom.

[32] ASSUMPÇÃO, M. (2022) **–** “Magnitude relations between the teleseismic $m_(b)$, the regional $m_(R)$ and $M_(w)$ for intraplate earthquakes in Brazil”, Journal of South American Earth Sciences, volume 120, Brazil.

[33] ASSUMPÇÃO, M. (1998a) – “Sismotectónica y esfuerzos en Brasil”, geophysics conference proceedings, intraplate stress field, Brazil.

[34] GARDNER, J. K. & KNOPOFF, L. (1974) – “Is the sequence of earthquakes Poissonian?”, Bulletin of the Seismological Society of America proceedings, seismic declustering, USA.

[35] KRAMER, S. L. (1996) – “Geotechnical Earthquake Engineering”, textbook, Prentice Hall, USA.

[36] ALMEIDA, A. A. D. (2002) – “Análise Probabilística de Segurança Sísmica de Sistemas e Componentes Estruturais”, PhD thesis presented at Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, seismic risk analysis, Rio de Janeiro, Brazil.

[37] MCGUIRE, R. K. (2004) – “Seismic hazard and risk analysis”, technical book, Earthquake Engineering Research Institute publications, seismic hazard methodology, USA.

[38] PEREIRA, E. M. V. (2021) – “Estudo da fragilidade sísmica de pórticos de concreto armado com irregularidades estruturais”, Master thesis presented at UNICAMP, structural seismic vulnerability, Campinas, Brazil.

[39] CORNELL, C. A. (1968) – “Engineering Seismic Risk Analysis”, Bulletin of the Seismological Society of America, seismic risk analysis, 58(5), USA.

[40] DOUGLAS, J. (2021) – “Ground Motion Prediction Equations 1964–2021”, technical report proceedings, GMPE synthesis, United Kingdom.

[41] TORO, G. R. (2002) – “Modification of the Toro et al. (1997) attenuation equations for large magnitudes and short distances”, Risk Engineering Inc., ground motion attenuation model, USA.

[42] CAMPBELL, K. W. (2003) – “Prediction of strong ground motion using hybrid empirical method”, Bulletin of the Seismological Society of America proceedings, GMPE development, USA.

Classificação: Setorial

[43] TORO, G. R. et al. (1997) – “Ground motion prediction equations for eastern North America”, seismic hazard proceedings, GMPE development, USA.

[44] TAVAKOLI, B., & PEZESHK, S. (2005) – “Empirical-Stochastic Ground Motion Prediction for Eastern North America”, USGS Workshop on Seismic Attenuation, engineering seismology proceedings, United States.

[45] ATKINSON, G. M. & BOORE, D. M. (2006) – “Earthquake ground-motion prediction equations for stable continental regions”, Bulletin of the Seismological Society of America, USA.

[46] ATKINSON, G. M. (2008) – “Ground-motion prediction equations for eastern Eastern North America”, Bulletin of the Seismological Society of America, USA.

[47] PEZESHK, S. et al. (2011) – “Hybrid empirical ground-motion prediction equations”, Bulletin of the Seismological Society of America proceedings, GMPE modeling, USA.

[48] BINDI, D. et al. (2011) – “Ground-motion prediction equations for European intraplate regions”, Bulletin of Earthquake Engineering, Europe.

[49] YENIER, E. & ATKINSON, G. M. (2015) – “Regionally adjustable ground-motion models”, Bulletin of the Seismological Society of America.

[50] BUDNITZ, R. J. et al. (1997) – “Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis”, NRC technical report proceedings, PSHA methodology, USA.

[51] ORDAZ, M.; AGUIRRE, J.; ARBOLEDA, J. (2018) – “CRISIS2018: Program for Computing Seismic Hazard”, UNAM Institute of Engineering, seismic hazard software, Mexico.

[52] ASSUMPÇÃO, M.; FERREIRA, J. M.; BARROS, L. V.; BEZERRA, F. H. R.; FRANÇA, G. S. L. A.; BARBOSA, J. R.; MENEZES, E. A.; RIBOTTA, L. C.; PIRCHINER, M. (2014) – “Intraplate seismicity in Brazil”, Tectonophysics, intraplate tectonics, 614, Netherlands.

[53] ASSUMPÇÃO, M. et al. (2002) – “Reservoir-induced seismicity in Brazil”, Pure and Applied Geophysics proceedings, induced seismicity, Switzerland.

[54] ASSUMPÇÃO, M. et al. (2016) – “Terremotos no Brasil: preparing for rare events”, SBGf bulletin proceedings, seismic hazard awareness, Brazil.

[55] HARIRI-ARDEBILI, M. A.; NUSS, K. L. (2025) Seismic Design of Concrete Dams: An Integrated Risk-Informed Performance-Based (RIPB) Framework. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, V. 55, n. 5: 1019–1049.

Classificação: Setorial

	**VILHENA, Ricardo** Geological Engineer, MSc in Geotechnics (UFG) and Dam Safety Specialist (UFBA). Over 20 years of experience in the Energy Sector (public/private). Extensive background in geological-geotechnical studies for hydro dams, covering mapping, drilling, geophysics, lab tests, and modeling. Currently in the Dam Safety management division at AXIA Energia Sudeste.
	**CONDORI QUISPE, Cristobal** Geophysicist from the Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Peru, with MSc and DSc in Applied Geosciences from the University of Brasília. Professor and researcher at UNSA, Director of IDIGUNSA, and former Seismology Analyst at IGP. Focuses on crustal and upper-mantle structure using seismological methods, with experience in induced seismicity, seismic hazard, inversion, and tomography.
	**RONDÁN SANABRIA, Edgar Rodolfo** Physics from UNSA (Peru), CEO & Co-founder of GEOONDAS Geofísica e Sensoriamento Remoto Ltda. Holds DSc and MSc in Physics from the University of São Paulo. Background in plasma physics, computational modeling, and high-performance computing, with experience at CBPF and CERN. Expertise in geophysical instrumentation, seismic methods, simulation, and machine learning for geophysical data.
	**DIOSES RAMIREZ, Marcela** Geophysical Engineer and Computer Science Technician from the National University of San Agustín, with research experience in seismicity analysis, seismic hazard assessment, and computational tool development. Her work includes studies on the influence of Earth tides on earthquake occurrence in the Pacific Ring of Fire.
	**VIANNA, Vinícius.** Geologist with 15 years in the Energy Sector, specializing in geotechnical and environmental studies for hydroelectric projects (SHP/HPP). Proven expertise in field mapping, environmental licensing (EIA/RIMA, PBA), physical environment programs, and coordination of Dam Safety processes across all project phases from inventory and feasibility to basic and executive designs.

Classificação: Setorial

PATROCÍNIO PLATINA

ITAIPU BINACIONAL

PATROCÍNIO OURO

CEMIG

VALE

CDA ACB

PATROCÍNIO PRATA

PdA

SYSDAM

ENGENHARIA & INSTRUMENTOS

PCP engenharia Geofísica e Monitoramento

AXIA ENERGIA

norteENERGIA

Rocha Engenharia

Intertechne

CTG Brasil

PATROCÍNIO BRONZE

Enemax

CHAMMAS ENGENHARIA

COLETANCHE GEOMEMBRANA BITUMINOSA

PROGEO

mútua

NORTENE

COPEL Pura Energia

ABRAGE

BELOSUN MINERAÇÃO

coba GROUP

APOIO

ANA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL

ANM Agência Nacional de Mineração

SEMAS/PA

ABRAPCH

IBRAM 50 YEARS BRAZILIAN MINING

Hydro

HUESKER Ideen. Ingenieure. Innovationen.