CIGB
ICOLD
CBDB

SEMANA DE BARRAGENS 2026

DAMSWEEK 2026

ANAIS

VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

VI SIB
SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E 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.

IN.1	**Projeto e Plano de Instrumentação de Barragens** Relator(es): Alexandre Vaz de Melo
IN.2	**Instalação de instrumentação** Relator(es): João Francisco Alves da Silveira
IN.3	**Análise de dados no diagnóstico de problemas** Relator(es): Ovídio Santos Jr.
IN.4	**Automatização e novas tecnologias de monitoramento** Relator(es): Filipe Colen Guimarães

SUMÁRIO

TEMA IN.1 – PROJETO E PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

1 - RELATO DO TEMA..... 9

2 - A IMPORTÂNCIA DE DRENOS INTERNOS NAS ESTRUTURAS DE BARRAGENS DE CONCRETO.....21

3 - BOAS PRÁTICAS DE CONTROLE DE EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO (EMM) PARA A CONFIABILIDADE DA INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS.....40

4 - UHE IRAPÉ: PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO COM FOCO NOS MODOS DE FALHA.....53

TEMA IN.2 – INSTALAÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO

1 - RELATO DO TEMA..... 73

2 - ESTUDO DE CASO: INSTRUMENTAÇÃO APLICADA EM UM ATERRO EXPERIMENTAL DE PDER DE MINÉRIO DE FERRO..... 90

3 - EXTENSÔMETRO MULTIPONTO COM ANCORAGEM HIDRÁULICA COMO SUBSTITUIÇÃO AO SISTEMA GRAUTEADO TRADICIONAL EM ESTRUTURA SUBTERRÂNEA DE CASA DE FORÇA.....106

4 - INSTALAÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO NA USINA APOLÔNIO SALES..... 122

5 - INSTALAÇÃO HORIZONTAL DE INCLINÔMETRO: METODOLOGIA, CUIDADOS E APLICAÇÕES.....134

6 - INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DE VIGAS MUNHÃO EM VERTEDOURO COM COMPORTAS..... 143

7 - INTEGRAÇÃO ENTRE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS (DPS) E SISTEMAS DE ATERRAMENTO NA INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA DE BARRAGENS DE CONCRETO.....163

TEMA IN.3 – ANÁLISE DE DADOS NO DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS

1 - RELATO DO TEMA..... 178

2 - A IMPORTÂNCIA DOS TARPS (TRIGGER ACTION RESPONSE PLAN) - INTERAÇÃO, FLUXO DE COMUNICAÇÃO E RESPOSTA AO DESVIO..... 185

3 - ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA INFLUÊNCIA DE FATORES GEOMÉTRICOS E ATMOSFÉRICOS EM DADOS DE ETR..... 200

4 - ANÁLISE INTEGRADA DE DADOS GEOESPACIAIS PARA DIAGNÓSTICO E AVALIAÇÃO DE BARRAGENS COMO FERRAMENTA DE MONITORAMENTO AMBIENTAL NO ESTADO DO PARÁ.....214

5 - AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO EM BARRAGENS E A INFLUÊNCIA DA PLUVIOMETRIA NA LINHA FREÁTICA..... 234

6 - AVALIAÇÃO DOS DRENOS DE ALÍVIO DA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM POR GRAVIDADE.....254

7 - DADOS PIEZOMÉTRICOS APLICADOS AO DIAGNÓSTICO DE SUBPRESSÕES E À DECISÃO DE DRENAGEM PROFUNDA EM BARRAGEM DE TERRA DA UHE JIRAU.....265

8 - DEFINIÇÃO DE TARP PARA MONITORAMENTO E RESPOSTA À DISSOLUÇÃO DE ROCHAS DOLOMÍTICAS NA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE REJEITO..... 285

9 - DESAFIOS DA GESTÃO CONTRATUAL EM SISTEMAS DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DE BARRAGENS DIANTE DA NECESSIDADE DE RESPOSTA RÁPIDA AO RISCO.....302

10 - DIAGNÓSTICO INTEGRADO DE LEITURAS PIEZOMÉTRICAS ANÔMALAS EM INSTRUMENTOS DA FAIXA DE JUSANTE: ESTUDO DE CASO DO DIQUE 14C DA UHE BELO MONTE.....322

11 - ESTUDO DE PRECIPITAÇÃO E ANOMALIAS EM BARRAGENS.....342

12 - GESTÃO DE RISCO, MONITORAMENTO E PROJETO DE RECUPERAÇÃO DA DRENAGEM DE PÉ DA UHE SALTO-GO.....351

13 - INTEGRAÇÃO DO MONITORAMENTO INSTRUMENTAL E VISUAL NA GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM GANGORRA (CE).....375

14 - MENSURAÇÃO E AVALIAÇÃO DA PRESSÃO NEUTRA EM BARRAGENS: UM ESTUDO DE CASO.....390

15 - METODOLOGIA NUMÉRICA INTEGRADA À INSTRUMENTAÇÃO PARA A GESTÃO DA SEGURANÇA DE ESTRUTURAS DE GRAVIDADE EM CONCRETO.....410

16 - MODELAGEM SAZONAL PARA DEFINIÇÃO DE LIMITES DE SEGURANÇA EM PIEZÔMETROS.....432

17 - MONITORAMENTO DE GRADIENTES NO TRECHO DA FUNDAÇÃO EM TERRAÇO ALUVIONAR DA BARRAGEM DE PORTO PRIMAVERA.....443

18 - MONITORAMENTO GEOTÉCNICO EM OBRAS DE ALTEAMENTOS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE COBRE: DESAFIOS DE CONFIABILIDADE, CLIMA E INTEGRAÇÃO DE DADOS.....460

19 - NÍVEIS DE CONTROLE/REFERÊNCIA PARA INSTRUMENTAÇÃO COMO FERRAMENTA DE GESTÃO DA SEGURANÇA DA BARRAGEM.....475

20 - PONDERAÇÕES SOBRE PROBLEMAS COMUNS NA OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS REFERENTES AO MONITORAMENTO DE BARRAGENS POR MEIO DE INSTRUMENTAÇÃO.....493

21 - REDUÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO POR MEIO DE INTERVENÇÃO NA DRENAGEM INTERNA EM UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA (PCH).....514

22 - TESTES DE RECUPERAÇÃO EM PIEZÔMETROS: EVIDÊNCIAS TÉCNICAS PARA A TOMADA DE DECISÃO NA SEGURANÇA DE BARRAGENS.....529

23 - UHE AMADOR AGUIAR II - DIAGNÓSTICO DA ORIGEM E SOLUÇÕES DE MONITORAMENTO E CONTROLE DA ÁGUA IDENTIFICADA NAS BERMAS DA BARRAGEM DE TERRA.....549

24 - VALIDAÇÃO CRUZADA ENTRE DADOS INSAR E MEDIÇÕES GEODÉSICAS NA DETECÇÃO DE DEFORMAÇÕES EM BARRAGENS.....565

25 - VALORES DE CONTROLE ESTATÍSTICOS PARA PIEZÔMETROS COM VARIAÇÕES SAZONAIS NAS MEDIDAS.....578

TEMA IN.4 – AUTOMATIZAÇÃO E NOVAS TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO

1 - RELATO DO TEMA.....598

2 - APRENDIZADO DE MÁQUINA APLICADO AO MONITORAMENTO SISMOLÓGICO DE BARRAGENS.....608

3 - AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DA TERMOGRAFIA EMBARCADA EM RPA EM CAMPANHAS DE INSPEÇÃO DE UMA BARRAGEM DE TERRA VISANDO A DETECÇÃO DE SURGÊNCIAS CONTROLADAS.....628

4 - CAIXAS SUECAS: DESEMPENHO, MANUTENÇÃO E AUTOMAÇÃO DE MEDIDORES HIDROSTÁTICOS EM BARRAGENS..... 648

5 - DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS TO IMPROVE PREDICTIVE MAINTENANCE OF DAMS.....670

6 - DIGITAL TWIN APLICADO AO MONITORAMENTO E MANUTENÇÃO DE ESTRUTURAS CIVIS: INTEGRAÇÃO DE DADOS E GESTÃO DE ATIVOS UHE BELO MONTE.....682

7 - IMPROVING MICRO-SEISMIC PHASE IDENTIFICATION AND EVENT LOCATION AT THE SERRA DA MESA HYDROELECTRIC DAM (BRAZIL) USING A PARAMETER-FREE SYNCHROSQUEEZED WAVELET DENOISING APPROACH..... 696

8 - INTERFEROMETRIA SÍSMICA APLICADA AO MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS: UMA NOVA ABORDAGEM PARA SISTEMA DE ALERTAS PRECOCES EM BARRAGENS E PILHAS DE REJEITO..... 714

9 - INVESTIGAÇÃO SOBRE REDUNDÂNCIA EM DETECÇÃO AUTOMATIZADA DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS: UMA ABORDAGEM COM VARIAÇÃO DE NÍVEL.....726

10 - MODERNIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS NA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ: ABORDAGEM HÍBRIDA PARA MONITORAMENTO PREDITIVO.....741

11 - MONITORAMENTO AUTOMATIZADO DE RECALQUES EM BARRAGENS POR PERFILADORES HIDROSTÁTICOS DISTRIBUÍDOS: ALTERNATIVA TÉCNICA ÀS CAIXAS SUECAS.....752

12 - MONITORAMENTO EFICIENTE DE CORTINAS ANCORADAS USANDO RADAR DE SOLO E ESTAÇÃO TOTAL ROBÓTICA..... 772

13 - OTIMIZAÇÃO DA INSPEÇÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS POR MEIO DE APLICATIVO MOBILE.....785

14 - PROPOSTA DE UM SISTEMA DE EXECUÇÃO ASSISTIDA DE PAE PARA MONITORAMENTO DE INCIDENTES EM BARRAGENS E AVISO À POPULAÇÃO..... 801

15 - SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO AUTOMÁTICA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE BARRAGENS DE BETÃO PARA APOIO NO CONTROLE DE SEGURANÇA ESTRUTURAL.....815

16 - SMART DAMS E INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA: REVISÃO CONCEITUAL E DESAFIOS PARA A ENGENHARIA BRASILEIRA.....835

SIB
SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

SEMANA DE BARRAGENS 2026
DAMSWEEK 2026

IN.1
PROJETO E PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

Alexandre Vaz de Melo – Cemig GT

Sumário – Projeto e Plano de Instrumentação

1 - Por que instrumentar uma barragem?

2 - Quais perguntas geotécnicas precisam ser respondidas?

3 - Quais são os parâmetros básicos a serem monitorados?

4 - Como e onde monitorar?

5 - Com que frequência serão monitorados?

6 - Quais procedimentos técnicos o plano de instrumentação deve conter?

7 - Como realizar a gestão e análise dos dados?

8 - Quem executará o trabalho?

9 - Quanto custará o sistema de medição?

10 - Quando o plano de instrumentação deve ser elaborado e atualizado?

Algumas referências publicadas* nos últimos anos...



*publicadas ou atualizadas

1 - Por que instrumentar uma barragem?

Declaração mundial sobre Segurança de Barragens (ICOLD, 2019)


DECLARAÇÃO MUNDIAL SOBRE
SEGURANÇA DE BARRAGENS


"Barragens Melhores Para Um Mundo Melhor"

Instrumentação como pilar da Segurança de Barragens

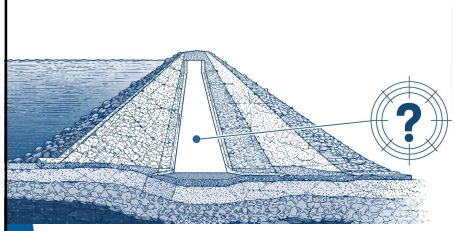
Um programa de instrumentação e monitoramento é essencial durante toda a vida de uma barragem.

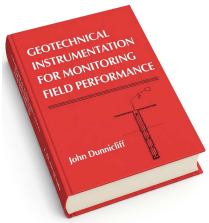
Um programa amplo de monitoramento de barragem é necessário para:

a) determinar o comportamento durante a construção;
b) avaliar o desempenho durante o primeiro enchimento do reservatório;
c) comparar a performance real com a de projeto;
d) caracterizar o comportamento de longo prazo;
e) prover alerta precoce de condições anormais;
f) capturar e analisar a resposta a eventos, tais como grandes cheias, terremotos, etc.;
g) prever o desempenho futuro da barragem;
h) demonstrar o gerenciamento seguro da barragem para entidades regulatórias.

2 - Quais perguntas precisam ser respondidas?

Definir os objetivos específicos de cada instrumento!





"The Red Book" (**Dunnicliff**, 1988)

"Every instrument installed on a project should be selected and placed to assist in answering a specific question."



Dr. Ralph B. Peck (1912-2008)

"If there is no question, there should be no instrumentation."

2 - Quais perguntas precisam ser respondidas?

ABNT 17189: "determinação dos objetivos específicos de cada instrumento e parâmetro monitorado, de acordo com os **modos de falha previamente identificados"**

Instrumentação baseada em modos de falha: diversas entidades destacam a utilização da metodologia de análise de risco (especialmente **PFMA** - *Potential Failure Mode Analysis)* para planejar, definir e atualizar programas de instrumentação e monitoramento de barragens:

- **USSD** (2013) - Routine Instrumental and Visual Monitoring of Dams based on PFMA
- **USSD** (2013) - Development of a Dam Safety Instrumentation Program
- **USBR** (2014) - Design Standards No. 13 - Embankment Dams Chapter 11 - Instrumentation and Monitoring
- **FEMA** (2015) - Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion
- **FERC** (2017) - Engineering Guidelines - Chapter 14 - Dam Safety Performance Monitoring Program
- **ASCE** (2018) – Monitoring Dam Performance – Instrumentation and Measurements
- **World Bank** (2020) - Good Practice Note on Dam Safety
- **USACE** (2020) - Instrumentation of Embankment Dams and Levees
- **ICOLD** (2022) - Dam surveillance - Lessons learnt from case histories

US Army Corps of Engineers

THE WORLD BANK

ASCE

USSD

FEMA

BUREAU OF RECLAMATION

FERC

2 - Quais perguntas precisam ser respondidas?

Artigo submetido ao tema IN.1

Comissão Técnica de avaliação dos artigos: Willamy Ferreira – Axia Energia

UHE IRAPÉ:
PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO COM FOCO NOS MODOS DE FALHA

Luiz Filipe Venturi VIANNA
Engenheiro Civil MSc. – Cemig

Teresa Cristina FUSARO
Engenheira Civil MSc. – Fusaro Engenharia e Consultoria Ltda.

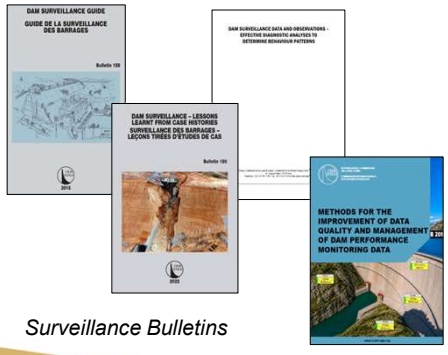
Alex Martins CALCINA
Engenheiro Civil – Intertechnne Consultores

Luiz Antônio MAIA Júnior
Engenheiro Civil Esp. – Cemig

3 - Quais são os parâmetros básicos a serem monitorados?

Categorização segundo ICOLD:

- Parâmetros de carga (cargas externas e internas)
- Parâmetros de resposta (respostas estruturais e hidráulicas)
- Parâmetros de integridade (indicadores de condição e desempenho)



Surveillance Bulletins

Table 4.1
Significant parameters for the monitoring of the behavior of the dam and its foundations

Concrete Dam	Embankment Dam	Foundations
Structural deformations	Deformations of the dam body	Deformations Abutment movements
Special movements (cracks, joints)	Special displacements (links with a concrete structure)	Special displacements (cracks, diaclases)
Dam body temperature	Dam body temperature to detect seepage (possible)	Dam body temperature to detect seepage (possible)
Uplift pressures (Contact concrete-foundation and in the rock)	Pore pressures in embankment dam body and piezometric level	Pore pressures Deep body uplift pressure Piezometric level Phreatic line level
Seepage and drainage rates	Seepage and drainage rates	Seepage and drainage rates and resurgences (sources)
Chemical analysis of seepage water Turbidity (possible)	Chemical analysis of seepage water Turbidity	Chemical analysis of seepage water Turbidity

ICOLD (2018)

4 - Como e onde monitorar?

Tipos de instrumentos a serem instalados e suas localizações

1 – Rever a regra fundamental: "***Every instrument installed ..*" !** (princípio de Peck)

- Não existem regras ou padrões para determinar o nível adequado de instrumentação e medições para monitorar o desempenho de uma barragem (**ASCE**, 2018).
- Cada barragem é única e não existe uma solução única que sirva para todos os casos - *"no one size fits all" (***ICOLD**, 2018*).*
- Selecionar o tipo errado de instrumento ou posicioná-lo em um local inadequado pode fornecer informações confusas ou desviar a atenção de problemas (**USACE**, 2020).

2 – Abordagem prática em 3 etapas (Dunnicliff, adotada pela USACE e outros)

Zonas de preocupação primária	Seções instrumentadas principais	Seções instrumentadas secundárias
Pontos críticos: interfaces solo / concreto, descontinuidades na fundação, contatos galerias/condutos, regiões com histórico de surgências, etc.	Seção de maior altura e seções sobre condicionantes geológico-geotécnicas da fundação	Comportamento comparativo em relação às seções principais

considerar verificação cruzada de dados com métodos de medição (tipos de instrumentos) diferentes

4 - Como e onde monitorar?

Características para seleção dos instrumentos

Devem possuir um histórico comprovado de bom desempenho prévio em condições reais de campo e em obras semelhantes

Onde houver escolha, o equipamento mais simples provavelmente terá a maior chance de sucesso

Confiabilidade

Simplicidade



Robustez,
Durabilidade,
Características metrológicas,
Facilidade de instalação e manutenção, etc.

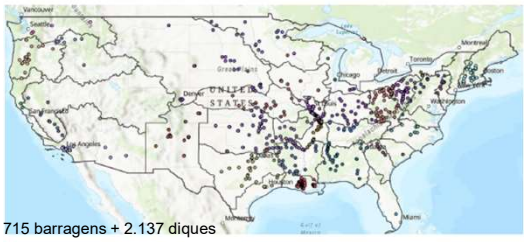
Considerar automatização parcial da instrumentação (soluções comerciais estão cada vez mais simples) e a utilização de novas tecnologias > **IN.4 !**

Fontes com características para seleção dos instrumentos: Dunnicliff (1988), Cruz (1996), Eletrobrás (2003), Swiss Commitee on Dams (2006), Silveira (2006), ICOLD (2009), USBR (2014), FERC (2015), ANA (2016), ASCE (2018), ICOLD (2018), CWC (2018), USACE (2020), World Bank (2021), ICOLD (2022)

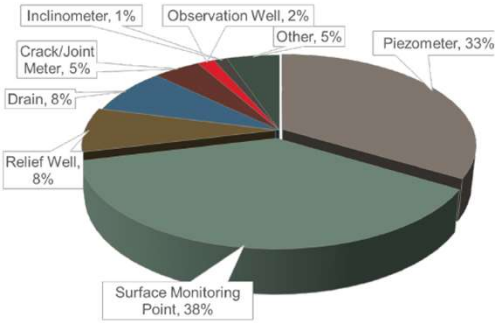
4 - Como e onde monitorar?

Tipos de instrumentos - Inventário de instrumentação USACE

- > 70,000 Instruments have been inventoried to date
- Average 106 instruments/project
- ~10-15% of all instruments are automated



715 barragens + 2.137 diques



US Army Corps of Engineers

USACE INSTRUMENTATION AND MONITORING
NRC PFHA WORKSHOP(2022)

4 - Como e onde monitorar?

Tabelas comparativas

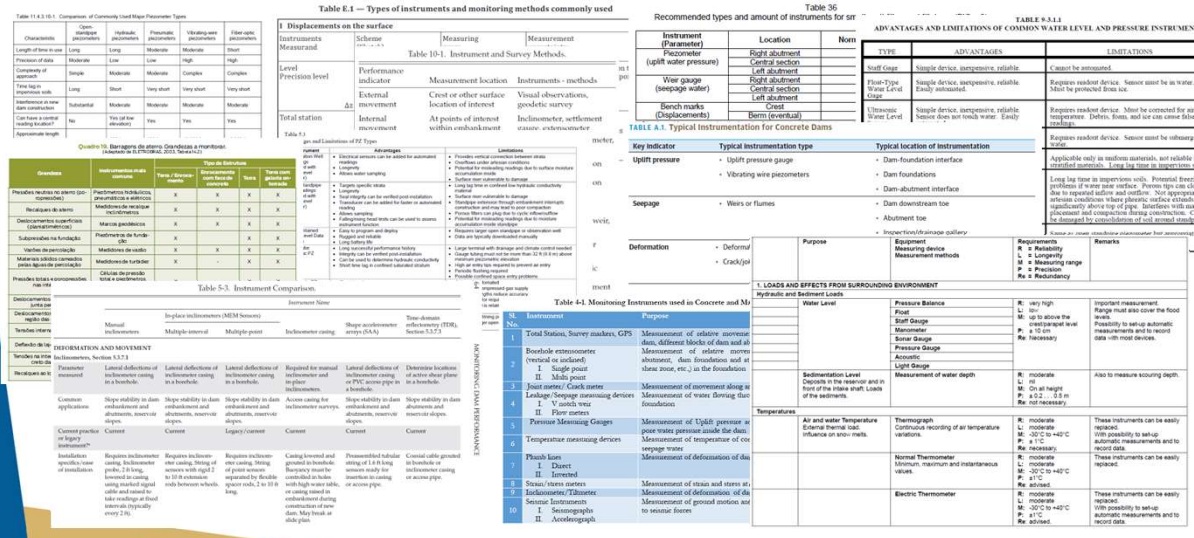


Table E.1 — Types of instruments and monitoring methods commonly used

Table 10-1. Instrument and Survey Methods.

Table 5-3. Instrument Comparison.

Table 4-1. Monitoring Instruments used in Concrete and Masonry Dams

Table 36 Recommended types and amount of instruments for str

TABLE 9.3.1.1 ADVANTAGES AND LIMITATIONS OF COMMON WATER LEVEL AND PRESSURE INSTRUMENTS

TABLE A.1. Typical Instrumentation for Concrete Dams

Fontes: USBR (2014), ISO (2015), ANA (2016), ICOLD (2016), FERC (2017), ICOLD (2018), ASCE (2018), CWC (2018), USACE (2020), World Bank (2021)

4 - Como e onde monitorar?

Instrumentos para *"General Health Monitoring"*: A importância de monitoramentos de baixo custo, longo prazo e alto valor diagnóstico, como medição de vazão de drenos em barragens de concreto e levantamento topográfico de marcos de superfície (**USSD,** 2013; **USBR,** 2014).

Artigo submetido ao tema IN.1

A IMPORTÂNCIA DE DRENOS INTERNOS NAS ESTRUTURAS DE BARRAGENS DE CONCRETO

Étore FUNCHAL DE FARIA
Engenheiro Civil - ITAIPU Binacional

Leonardo BRANDALIZE MEDEIROS
Engenheiro Civil - ITAIPU Binacional

Ricardo Elias MIRANDA ROJAS
Engenheiro Civil - ITAIPU Binacional

Francisco RODRIGUES ANDRIOLO
Engenheiro Civil - Consultor

5 - Com que frequência serão monitorados?

Frequências de medição

Dependem de:

- **Fase de implantação** (construção, primeiro enchimento, início da operação e operação normal)
- **Nível de segurança da barragem** (riscos e consequências associados)
- **Parâmetro** que está sendo monitorado







ABNT NBR 17189

Tabela 1 – Recomendações de frequência de medição

Parâmetros	Construção	Primeiro enchimento	Início da operação	Operação normal
Nível d'água do reservatório	Semanal	Diário	Três vezes por semana	Semanal
Precipitação pluviométrica	Semanal	Diário	Três vezes por semana	Semanal
Vazão de infiltração	-	Diário	Três vezes por semana	Semanal
Carreamento de sedimentos	-	Diário	Três vezes por semana	Semanal
Nível freático	-	Duas vezes por semana	Semanal	Mensal
Pressão total/efetiva	Semanal	Diário	Semanal	Mensal
Poropressão	Semanal	Diário	Semanal	Quinzenal
Subpressão	Semanal	Diário	Duas vezes por semana	Quinzenal
Descolamentos superficiais, horizontais e recalques, na crista e taludes	Semanal	Semanal	Mensal	Entre estações
Movimentos horizontal, vertical, rotacional ou translacional	Semanal	Diário	Quinzenal	Mensal
Movimentos entre blocos e deslocamento relativo (juntas)	Semanal	Diário	Quinzenal	Mensal
Temperatura do concreto	Diário	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Deslocamentos internos e deformação	Semanal	Semanal	Quinzenal	Mensal
Deslocamento absoluto (geodésico)	Ao final da construção	Mensal	Trimestral	Semestral
Deslocamento angular	Quinzenal	Semanal	Mensal	Mensal

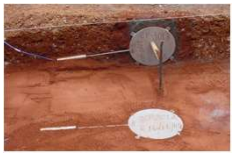
Algumas fontes com tabelas de frequência: CBDB (1996), Eletrobrás (2003), ANA (2016), ASCE (2000), ABNT (2024), CWC (2018), World Bank (2021), FERC (2015), USACE (2020)

6 - Quais procedimentos técnicos o plano de instrumentação deve conter?

SIB VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Procedimentos de instalação

- *"The monitoring system is only as good as the installation"* *(Ralph Peck)*
- Tema **IN.2** !



Procedimentos de calibração e manutenção

- A calibração periódica é a garantia de que o tempo não transformou o seu instrumento em um ponto cego!

Artigo submetidos ao tema IN.1

BOAS PRÁTICAS DE CONTROLE DE EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO (EMM) PARA A CONFIABILIDADE DA INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

Luiz Carlos HIPÓLITO JÚNIOR
Técnico Civil – Cemig
Alexandre Vaz de MELO
Engenheiro Civil MSc. – Cemig
Márcio Pereira WERNECK
Técnico Civil – Cemig
Ananda Assumpção CARNEIRO
Engenheiro Civil MSc. – Cemig

7 - Como realizar a gestão e análise dos dados?

SIB VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Procedimentos de coleta, registro, processamento, análise de dados e relatórios

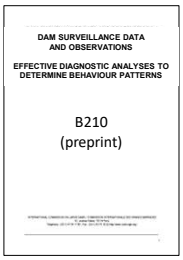
Valores de controle e respostas às mudanças críticas (ações corretivas)

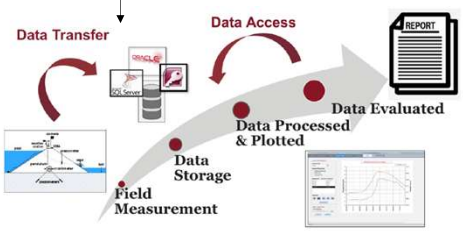
- Tema **IN.3** !



DADO → INFORMAÇÃO → DIAGNÓSTICO → DECISÃO







8 - Quem executará o trabalho?

Matriz de responsabilidades

Exemplo de atribuição de tarefas para um programa de monitoração executado pelo proprietário (**DUNNICLIFF**, 1993 citado por **SILVEIRA**, 2006)

TAREFA	PROPRIETÁRIO	CONSULTOR DO PROJETO	ESPECIALISTA EM INSTRUMENTAÇÃO	EMPRESA CONSTRUTORA
Concepção do plano de auscultação	✓	✓	✓	
Aquisição dos instrumentos e calibrações de fábrica		✓	✓	
Instalação dos instrumentos			✓	✓
Manutenção e calibração periódica dos instrumentos			✓	✓
Estabelecimento da programação de coleta de dados		✓	✓	
Aquisição dos dados			✓	✓
Processamento e apresentação dos dados			✓	
Análise e elaboração de relatórios periódicos		✓	✓	
Decisão pela implementação das recomendações e das medidas corretivas	✓	✓		

9 - Quanto custará o sistema de medição?

Orçamento e aquisição

- Nenhuma das referências listadas estabelecem um valor percentual padrão para o custo do projeto de instrumentação em relação ao custo total da obra.
- O custo da instrumentação é tão reduzido em comparação ao custo global da obra que jamais deve ser o fator decisivo no projeto ou na licitação (cabe discussão para pequena barragens e para reinstrumentação em barragens existentes).
- **Tentar obter economia de recursos sacrificando o plano de monitoramento é imprudente!**

Segundo **ASCE** (2018):

- Elaboração da estimativa do investimento para aquisição, instalação e calibração inicial do sistema de monitoramento. Considerar o custo de todos os componentes e acessórios do sistema - tais como cabos, conduítes, dispositivos de proteção, hardware e software.
- A aquisição deve ser baseada em um conjunto de desenhos e especificações técnicas que refletem a intenção do projeto.
- Recomenda-se que o **engenheiro especialista em instrumentação** esteja envolvido não apenas durante a fase de planejamento e projeto, mas também durante a aquisição.



10 - Quando o plano de instrumentação deve ser elaborado e atualizado?


NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 13028

Elaboração:

- O plano de instrumentação deve ser preparado na fase de **projeto básico***
- E, caso necessário, na fase de operação, especialmente no caso de barragem existente não instrumentada adequadamente.

Revisão / Atualização:

- No final da construção – projeto como construído
- No final do primeiro enchimento do reservatório
- Nas Revisões Periódicas de Segurança



Estrutura do Plano de Instrumentação

Referências com checklist / conteúdo detalhado do plano de instrumentação

O escopo e o detalhamento do plano devem ser compatíveis com o tipo, porte, risco potencial da barragem, entre outros fatores.


APPENDIX A

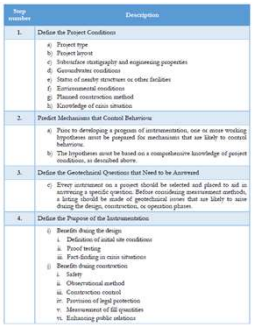
CHECKLIST FOR PLANNING STEPS

Dunnicliff, 1988


Conteúdo mínimo:

- Grandezas a monitorar.
- Instrumentos a instalar.
- Desenhos de planta, vistas e seções transversais, com localização exata de cada instrumento, detalhes de instalação.
- Especificações dos instrumentos:
  - Especificações técnicas dos instrumentos a instalar, equipamentos de leitura e de transmissão de dados.
  - Cuidados a tomar na instalação.
  - Dados e requisitos para calibração.
- Leituras e processamento dos dados:
  - Metodologia de leitura, processamento e registro dos dados.
  - Registro da leitura inicial de cada instrumento.
  - Frequência de leitura dos instrumentos.
  - Valores de referência para futuras medições.
  - Faixas normais de operação e níveis de alarme.
  - Valores para os quais uma revisão detalhada das leituras é necessária.
- Manutenção dos instrumentos.

ANA, 2016


Step number	Description
1.	Define the Project Conditions
	a) Project type b) Project layout c) Subsurface stratigraphy and engineering properties d) Groundwater conditions e) Status of nearby structures or other facilities f) Environmental conditions g) Planned construction method h) Knowledge of crisis situation
2.	Predict Mechanisms that Control Behaviour
	a) Prior to developing a program of instrumentation, one or more working hypotheses must be prepared for mechanisms that are likely to control behaviour. b) The hypotheses must be based on a comprehensive knowledge of project conditions, as described above.
3.	Define the Geotechnical Questions that Need to be Answered
	c) Every instrument on a project should be selected and placed to aid in answering a specific question. Before considering instrument methods, a listing should be made of geotechnical issues that are likely to arise during the design, construction, or operation phases.
4.	Define the Purpose of the Instrumentation
	i) Benefits during the design i. Definition of actual site conditions ii. Proof testing iii. Fact-finding in crisis situations ii) Benefits during construction i. Safety ii. Observational method iii. Construction control iv. Provision of legal protection v. Measurement of fill quantities vi. Enhancing public relations

CWC, 2018


Annex A: Table of Contents (Sample)

1. Introduction
2. Key Features of Dam
   - 2.1. Main Characteristics of Dam and Appurtenant Structures
   - 2.2. Surrounding Conditions and Potential Hazards
3. Instrumentation Monitoring System and Program
   - 3.1. Purpose of Instrumentation
   - 3.2. Instrumentation Scope and Requirements
   - 3.3. Life-Cycle Management of Instrumentation System
   - 3.4. Monitoring Program (Key Indicators, Instrumentation Types, and Reading Frequency)
   - 3.5. Installation and Maintenance
4. Data Management
   - 4.1. Data Collection, Processing, and Storage
   - 4.2. Data Analysis and Interpretation
   - 4.3. Reporting

Appendices

Maps, drawings, diagrams, check sheets, and so on should be attached as appendixes, including the following (examples):

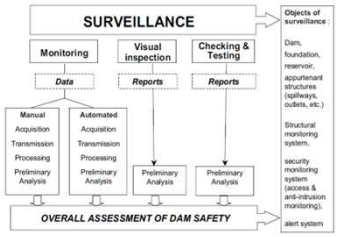
- An inventory of all monitoring instruments (types, numbers, location, key specification, and so on)
- Instrumentation layout plans and as-built drawings
- A table of instruments' reading frequency
- Manufacturers' manuals for monitoring instruments

World Bank, 2021

Em essência, a qualidade de um plano de instrumentação pode ser medida pela sua capacidade de responder, com clareza e rigor técnico, a cada uma das 10 perguntas anteriores.
Fator importante: experiência da projetista

Considerações finais

- Um programa de instrumentação e monitoramento é essencial durante toda a vida de uma barragem (**ICOLD**, 2019). Qualquer barragem que possa afetar a segurança de pessoas deve dispor de instrumentação básica para monitorar seus sinais vitais (**FERC**, 2015).
- Instrumentos não corrigem projetos deficientes ("*instrumentation is not an end in itself" – Peck / **Dunnicliff**, 1988*).
- O melhor instrumento não aumenta a segurança da barragem se não estiver funcionando, se estiver registrando informações irrelevantes, se estiver no local errado, se não for monitorado com a frequência adequada ou se os dados obtidos não forem avaliados (**ASCE**, 2018).
- Um bom projeto / plano de instrumentação responde a perguntas críticas, é proporcional ao risco, permanece simples quando possível e só tem valor quando seus dados sustentam decisões oportunas.
- A instrumentação precisa ser mantida na perspectiva correta. Ela é apenas uma parte de um conjunto mais amplo de atividades de monitoramento (Peck / **Dunnicliff**, 1988).



Lista de referências

- ABNT NBR 17189, 2024 - Instrumentação em barragens - Requisitos
- ANA, 2016 - Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens
- ANA, 2016 - Diretrizes para Elaboração Projetos Barragens
- ASCE, 2000 - Guidelines for Instrumentation and Measurements for Monitoring Dam Performance
- ASCE, 2018 - Monitoring Dam Performance - Instrumentation and Measurements
- BO & BARRET, 2023 - Geotechnical Instrumentation and Applications
- CBDB, 1996 - Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil
- CRUZ, 1996 - 100 Barragens Brasileiras – Casos históricos, Materiais de Construção, Projeto
- CWC, 2018 - Guidelines for Instrumentation of Large Dams
- DUNNICLIFF, 1988 - Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance
- ELETROBRÁS, 2003 - Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas
- FELL ET AL, 2015 - Geotechnical Engineering of Dams - 2nd Edition
- FEMA, 2015 - Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion
- FERC, 2015 - Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects - Chapter 9 - Instrumentation and Monitoring
- FERC, 2017 - Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects - Chapter 14 - Dam Safety Performance Monitoring Program
- ICOLD, 2009 - General Approach to Dam Surveillance
- ICOLD, 2016 - Small Dams - Design, Surveillance and Rehabilitation
- ICOLD, 2018 - Dam Surveillance Guide
- ICOLD, 2019 - World Declaration on Dam Safety
- ICOLD, 2022 - Anais - Twenty-Seventh International Congress On Large Dams
- ICOLD, 2022 - Dam surveillance - Lessons learnt from case histories
- ICOLD, 2026 - Methods for the improvement of data quality and management of dam performance monitoring data
- ICOLD - Dam surveillance data and observations - Effective diagnostic analyses to determine behaviour patterns
- ISO 18674 - Geotechnical investigation and testing - Geotechnical monitoring by field instrumentation
- PTI & ITAIPU BINACIONAL, 2019 - Curso de Instrumentação e Auscultação de barragens - material de apoio
- SILVEIRA, 2003 - Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto
- SILVEIRA, 2006 - Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento
- SILVEIRA, 2025 - A Detecção de Problemas Técnicos em Barragens de Concreto através da Instrumentação
- SWISS COMMITEE ON DAMS, 2006 - Dam Monitoring Instrumentation - Concepts, Reliability and Redundancy
- USACE, 1987 - Instrumentation for Concrete Structures
- USACE, 2020 - Instrumentation of Embankment Dams and Levees
- USBR, 1987 - Concrete Dam Instrumentation Manual
- USBR, 1987 - Embankment Dam Instrumentation Manual
- USBR, 2014 - Design Standards No.13 - Embankment Dams Chapter 11 - Instrumentation and Monitoring
- USSD, 2013 - Development of a Dam Safety Instrumentation Program
- USSD, 2013 - Routine Instrumental and Visual Monitoring of Dams based on PFMA
- WORLD BANK, 2020 - Good Practice Note on Dam Safety
- WORLD BANK, 2021 - Good Practice Note on Dam Safety - Appendix 2 - Instrumentation Plan


Obrigado !
alexandre.melo@cemig.com.br
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
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.1
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

A IMPORTÂNCIA DE DRENOS INTERNOS NAS ESTRUTURAS DE BARRAGENS DE CONCRETO

Étore FUNCHAL DE FARIA
Engenheiro Civil - ITAIPU Binacional

Leonardo BRANDALIZE MEDEIROS
Engenheiro Civil - ITAIPU Binacional

Ricardo Elias MIRANDA ROJAS
Engenheiro Civil - ITAIPU Binacional

Francisco RODRIGUES ANDRIOLO
Engenheiro Civil - Consultor

RESUMO

O projeto estrutural da UHE Itaipu aplicou o conceito de um sistema de drenos de cabeça, interconectados às galerias da barragem principal, para otimizar o diagrama de subpressões, e eventualmente, para avaliar a estanqueidade da face de montante da barragem, durante o pré-enchimento e o próprio enchimento do reservatório, e efetuar as correções de eventuais defeitos. Neste conceito, as próprias galerias servem para monitoramento e eventuais ações remediais. Eles eram usados, conceitualmente, para reduzir o diagrama de pressões que pudessem se estabelecer, como normalmente são projetados os drenos nas galerias junto a fundação. Esta ação permitiu mitigar riscos durante a vida e utilidade da Barragem. Na fase operacional, fase atual da vida da usina, esses drenos têm sido monitorados e demonstram a alta qualidade das estruturas de concreto - incluindo as juntas - com valores baixos de vazão medidos. Este trabalho visa a apresentar os resultados de análises de dados de endoscopia e de vazão medida em três drenos e das ações de manutenção desses drenos, que contribuem para o bom desempenho da barragem.

ABSTRACT

The structural design of the Itaipu Hydroelectric Power Plant applied the concept of a system of internal drains, interconnected to the dam's galleries, to assess the watertightness of the upstream face of the dam during pre-filling and filling of the reservoir, and to correct any potential defects. In this concept, the galleries themselves serve for monitoring and potential remedial actions. Conceptually, they were used to reduce the pressure diagram that could develop, such as the drains in the galleries near the foundation. This action mitigated risks throughout the dam's lifespan and operational life. In the operational phase, the current phase of the plant's life, these drains have been monitored and demonstrate the high quality of the

concrete structures – including the joints – with low measured flow rates. This study aims to present the results of analyses of endoscopic data and measured flow rates from three drains, as well as the maintenance actions performed on these drains, all of which contribute to the dam's satisfactory performance.

1. INTRODUÇÃO

No final do século XVIII e no século XIX, houve uma transição de barragens “intuitivas” para barragens “racionais”, quando os experimentos passaram a ser validados pela racionalidade dos conceitos e características dos materiais. Em 1887, Le Chatelier definiu parcialmente os constituintes do cimento Portland – a definição completa foi obtida por Robert Herman Bogue, em 1929. Em 1890, experiências já permitiram análises das influências do fator água/cimento no concreto.

Com a segunda ruptura da barragem de Bouzey, na França, em 1894, engenheiros perceberam que a água infiltrada sob a estrutura podia exercer uma força ascendente significativa, comprometendo a estabilidade da barragem; e passaram estudar amplamente e a incorporar os conceitos de pressões internas – e de subpressão, na fundação.

As discussões iniciais sobre a poropressão e pressão intersticial datam de meados do século passado, no final dos anos 40. Estudos complementares convergiram ao entendimento de que a qualidade do concreto, em especial a porosidade e a permeabilidade, pode permitir esforços adicionais e aumentar a instabilidade, incrementando os riscos à segurança estrutural da barragem. Adicionalmente, problemas de durabilidade, como a perda de resistência e/ou de estabilidade pela lixiviação de calcita ($CaCO_3$), também estão conectados à qualidade do concreto.

Há uma aparente diferença entre conceitos de projetos antigos e novos sobre drenos de concreto. As barragens das UHEs Ilha Solteira, Tucuruí e Itaipu, por exemplo, seguiram a boa prática de execução de drenos internos (na Massa do concreto-próximo à face acima da Fundação) para melhorar a estabilidade e a durabilidade das estruturas, enquanto algumas barragens mais novas – talvez nos últimos 10 anos – tem-se notado a falta desse conceito. Não há registros sobre o que motiva esta decisão, o que pode induzir ao entendimento de que há uma comodidade em não usar, para reduzir cuidados e custos durante a construção.

Neste artigo, os autores apresentam as vantagens da inclusão desses drenos em estruturas de barragens de concreto, tendo como exemplo as estruturas da Barragem Principal e da Barragem Lateral Direita, da Usina Hidrelétrica de Itaipu. São mostrados os resultados – e as vantagens – do uso de drenos para testes de estanqueidade, com o pré-enchimento parcial do reservatório, assim como do uso desses dispositivos como elementos de monitoramento atualmente. Nesta última aplicação, evidencia-se, também, como o efetivo controle de qualidade se reverte em durabilidade e longevidade de barragens de concreto.

2. PRESSÕES INTERNAS EM BARRAGENS DE CONCRETO

A segunda ruptura da barragem de Bouzey, na França, em 1895, alertou os especialistas para dois fenômenos que eram ignorados até então: a subpressão, naquele caso, no contato concreto-fundação; e os problemas de pressão interna, na época, em barragens de alvenaria [1].

A presença e os efeitos das subpressões hidrostáticas dentro da barragem e em suas fundações foram temas controversos por muitos anos [2]. Mas o conceito introduzido por Harza [3] tem sido aceito para projetos de barragens de gravidade de concreto. Ou seja, a subpressão pode atuar em toda a seção do contato concreto-fundação ou

concreto-concreto (juntas e fissuras), onde possa ocorrer elevada permeabilidade de maneira distribuída e progressiva. Dedicaram-se ao estudo do tema: Harza [3], Creager *et al.* [4], Zienkiewicz [5], Carlson [6], Zee [7], Zee, Zee e Zee [8].

Mason [9] cita que o assunto foi objeto de estudo no tratado sobre barragens da F. Tölke (1938)[1] e do Professor Lajinha Serafim (1965)[2], que publicou uma série de trabalhos sobre o problema de pressões nos poros do concreto, que se estenderam também a meios anisotrópicos.

2.1 Poropressão

A poropressão em barragens de concreto se refere à pressão do fluido (geralmente água) que ocupa os poros e fissuras. Esse conceito é fundamental em engenharia civil, pois a poropressão pode influenciar diretamente a resistência e a durabilidade do concreto, especialmente em ambientes saturados ou sob carga assim como onde existam deficiências, como fissuras, falta de adensamento, porosidades, isto é, sem estanqueidade. O desenho da Figura 1 indica como funciona a poropressão: a pressão exercida por um líquido dentro dos poros contra a matriz sólida.

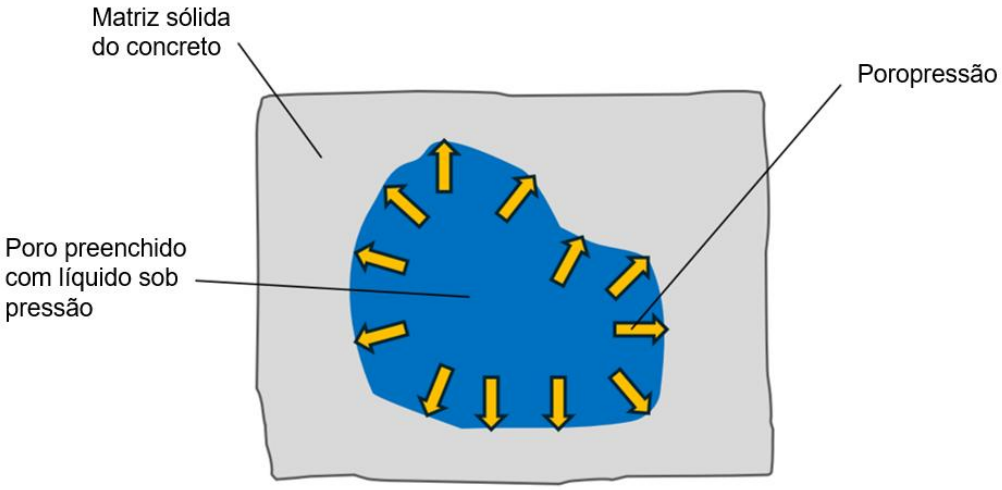


Figura 1 – Poropressões no concreto. (Fonte: Autor)**.**

Para Zee, Zee e Zee [8], a água do reservatório atua além de um carregamento na face de montante da barragem. Ela pode promover uma pressão nos poros do concreto, alterando as tensões internas, criando força de elevação devida ao efeito de flutuabilidade e pela força de percolação da água.

Zienkiewicz [5] mostra que uma linha de drenos dentro da barragem pode reduzir as pressões nos poros de forma descontínua, e que a distribuição de tensões verticais é próxima da linearidade, mesmo com variações na pressão dos poros. O autor ainda destaca a importância do projeto de barragens considerando a compressão necessária para evitar tensões de tração.

[1] Tölke, F. – *Talsperren* – 2. *Hälfte* – *I Teil der Wasserkraftanlagen* – Springer – Berlin – 1938. Bibliografia não citada nas referências por não estar disponível para consulta.
[2] Serafim, J.L. – *Déformations du Béton Dues aux Pressions dans les Pores* – Bulletin RILEM nº. 27 – June 1965. Bibliografia não citada nas referências por não estar disponível para consulta.

A baixa permeabilidade do concreto impede o desenvolvimento de poropressão sob toda a face de contato concreto-fundação em barragens com carga hidrostática (ou "em carga"), de acordo com Carlson [6]. E ele complementa, afirmando que levaria séculos para que esta condição se estabelecesse entre o vértice inferior da face de montante e o da face de jusante (comprimento total da base – ou fundação – da barragem).

2.2 Pressão intersticial

A pressão intersticial é uma consequência da infiltração de água nos vazios do concreto. Esta pressão também tem sido estudada em barragens de concreto há bastante tempo. Mason [9] cita que o assunto também foi objeto de estudo no tratado sobre barragens da F. Tölke, publicado em 1938.

"O concreto (da barragem) é um meio poroso e a água represada nele penetra, causando pressões intersticiais nos poros, que influem no estado de tensão da barragem" [9]. Nesta linha, Juliani *et al.* [10][11] reforçam que a percolação de água é um dos fenômenos mais importantes em barragens de concreto e que ela pode causar esforços adicionais na estrutura (pressão nos poros ou intersticiais), além de causar problemas funcionais como vazamentos e corrosão de armadura e, principalmente, de degradação do concreto pela lixiviação de compostos que conduzem à perda de resistência e estabilidade.

A pressão intersticial está associada às superfícies onduladas que tocam os pontos de contato dos grãos sólidos entre si [9], como ilustra o desenho esquemático da Figura 2.

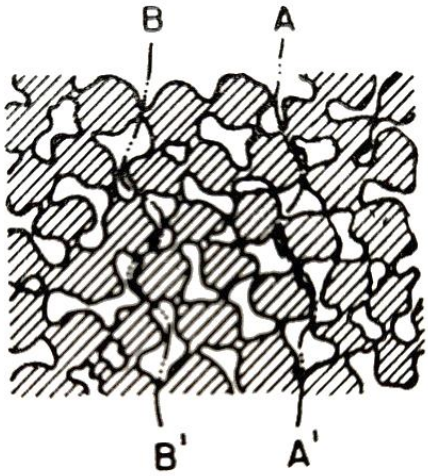


Figura 2 – Superfícies potenciais de ruptura. [9]**.**

Juliani *et al.* [10][11] afirmam que até o início do século XX, as análises de tensões em barragens eram realizadas supondo o concreto impermeável e a fundação permeável e as pressões internas no concreto eram geradas pela ação da água em eventuais fissuras, como ilustra a Figura 3. Os autores relatam, porém, que os engenheiros da Tennessee Valley Authority – T.V.A., maior fornecedora pública de energia dos Estados Unidos da América, mostraram, na década de 40, que esse método era insatisfatório, a partir de medições de pressões nos poros das barragens de Hiwassee e de Fontana. E adicionam que os modelos na década de 80 já

consideravam que a pressão de água atuaria também como uma força de volume dentro da estrutura.

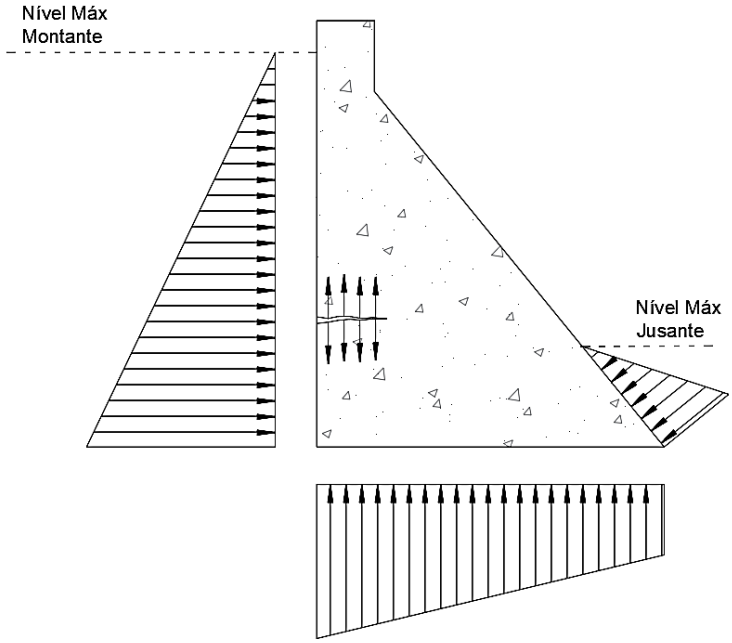


Figura 3 – Ação da água sobre uma barragem conforme conceitos do início do século XX. (Adaptado de [10][11]).

Um estudo com medidores de pressão intersticial foi feito no vertedouro da UHE Ilha Solteira [10][11]. Os resultados mostraram que o estabelecimento de critérios de impermeabilidade estabelecidos nas especificações técnicas do projeto e execução daquela obra foram fundamentais para a qualidade do concreto e a baixa permeabilidade das estruturas hidráulicas.

3. PROJETOS DE BARRAGENS COM DRENOS INTERNOS

Grandes barragens projetadas nos anos 60–80 incorporaram drenos internos (drenos de cabeça). No entanto, em critérios de projeto de várias renomadas instituições do mundo, observa-se que as poropressões e a permeabilidade da fundação são abordadas somente para cálculo de subpressões na estrutura no contato concreto-rocha, como pode ser observado nos documentos do *Bureau of Reclamation* [12][13], da Eletrobras [14], do *Bureau of Indian Standards* [15] e do *National Energy Administration*, da China [16]. Nos critérios da *U.S. Army Corps of Engineers* [17], para barragens de CCR, os autores informam que “a determinação do percentual de subpressão dependerá da permeabilidade da mistura (do concreto) ...” (tradução nossa). Chawla, Thakur e Kumar [18] atentam que para um projeto econômico e seguro, é crucial estimar realisticamente as pressões internas.

Em barragens de CCR, Andriolo [19] propõe uma alternativa para a previsão de uma linha de drenos moldados na transição entre o concreto convencional do paramento e o concreto compactado com rolo, além da linha de drenos entre os veda-juntas da região do paramento de montante (Figura 4). Segundo o autor esses drenos constituem uma segurança suplementar ao sistema de impermeabilização principal,

composto pelos veda-juntas. Os drenos devem ser conectados às galerias em vários níveis, quando esta necessidade for identificada em projeto.

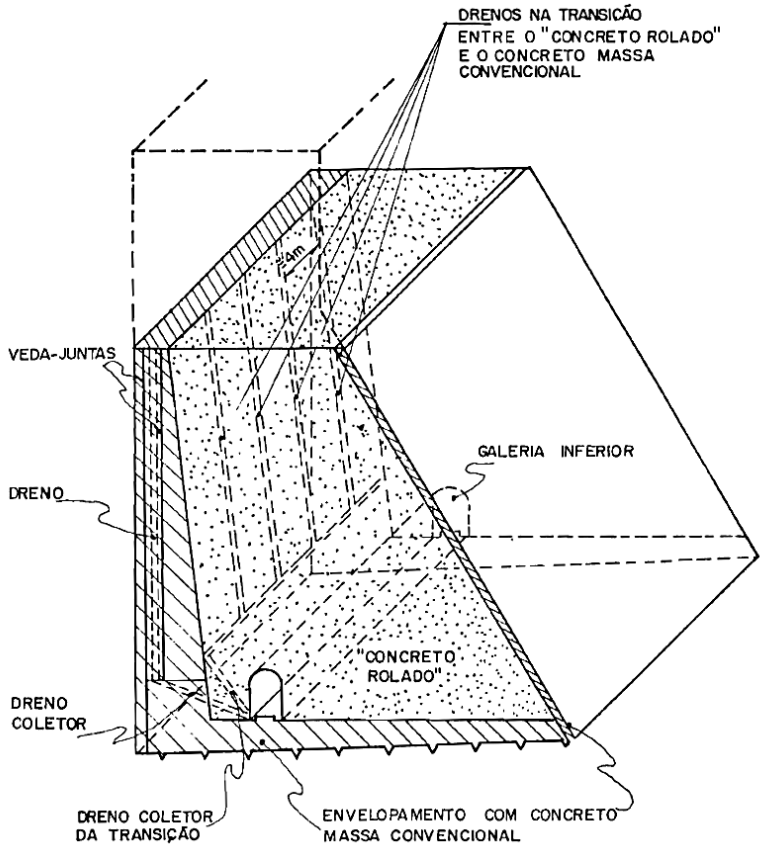


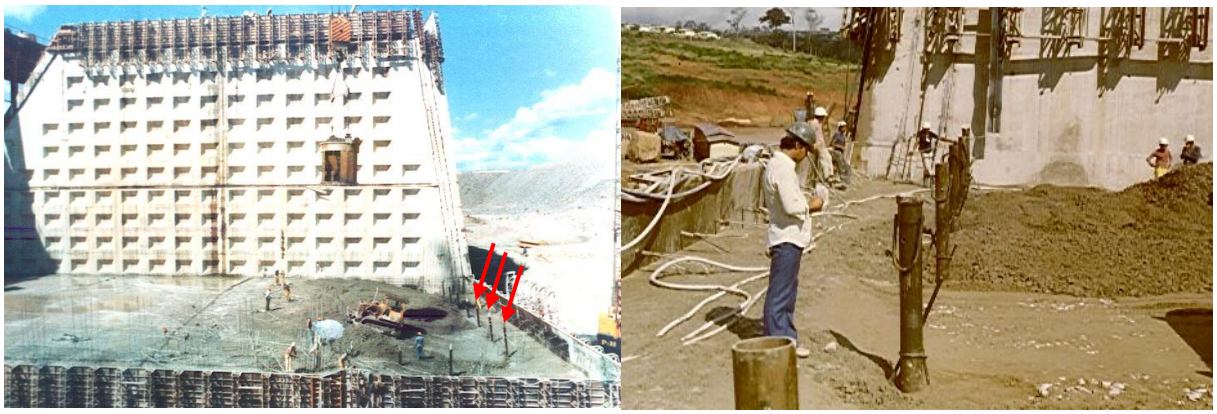
Figura 4 – Sistema de drenos suplementares. [19]

Devido à possível infiltração de água ao longo de juntas de construção, fissuras e no contato com a fundação, a pressão interna deve ser considerada em toda a barragem. As pressões hidrostáticas internas devem ser utilizadas para análises da barragem e da estabilidade global dela no seu contato com a fundação. [18]

A Metodologia de inclusão de drenos de cabeça se estabeleceu pelas dúvidas existentes (nas décadas de 1960 a 1980, mas que ainda persistem) sobre a efetividade do tratamento da superfície das juntas de construções. E deve ser adotada como reserva de Segurança. As usinas de Ilha Solteira, Tucuruí ((a) (b)

Figura 5) e Itaipu são bons exemplos desta prática. Em Itaipu, esta ação foi feita com foco em aumentar a Segurança, considerando, principalmente, a (maior) altura – inédita na época – da barragem.

Ao longo dos anos, o método de execução de tratamento de juntas evoluiu, mas ainda há problemas executivos vistos em alguns empreendimentos. Algumas barragens, inclusive, nem possuem galeria de drenagem.

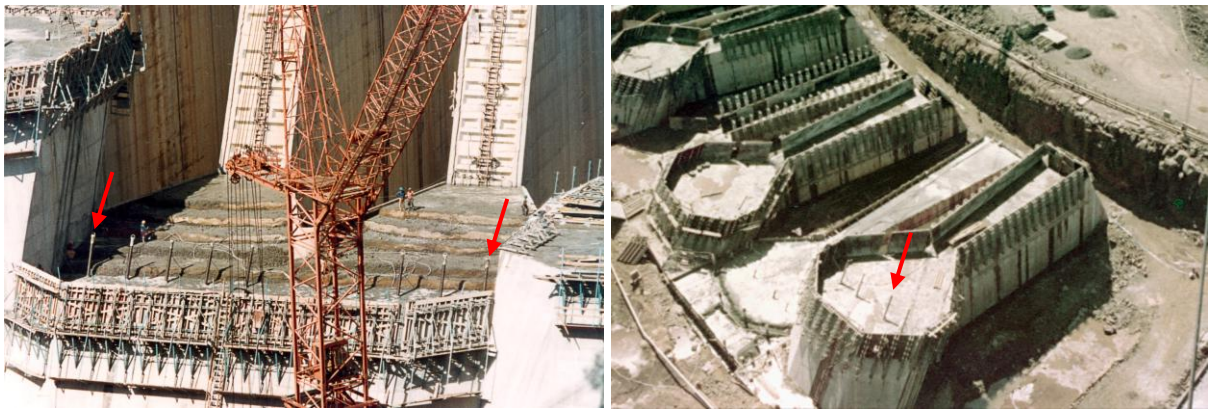


(a) (b)

Figura 5 – Tucuruí – linhas de drenos nos blocos de transição (a) e nos muros laterais das eclusas (b). (fonte: autores).

4. DRENOS INTERNOS NA BARRAGEM DE ITAIPU

Em Itaipu, a Barragem Principal e as Barragens de Contrafortes[3] possuem drenos de cabeça (drenos internos no concreto), indicados pelas setas na Figura 6, e drenos instalados nas juntas entre blocos adjacentes, cuja função é coletar e conduzir a água que infiltra e percola através das estruturas. As cabeças dos blocos da Barragem Principal possuem 10 drenos e as cabeças (diamante) dos blocos das barragens em contrafortes possuem 5 drenos. Os drenos são direcionados, nas suas extremidades inferiores, a segmentos horizontais que drenam a água para fora das cabeças.



(a) (b)

Figura 6 – ITAIPU – Drenos de cabeça na Barragem Principal (a) e na Barragem Lateral Direita, em contrafortes (b).

Na Barragem Principal existem 18 drenos de junta (um em cada junta, entre os veda-juntas tipo *Fugenband*®) com 25 cm de diâmetro, instalados desde a crista da barragem (El. 225,00 m) até próximo à fundação, onde suas cotas de saída variam conforme as características de cada bloco. As saídas superiores são protegidas por placas pré-moldadas removíveis e as inferiores são canalizadas por tubos de 20 cm até as calhas de drenagem.

[3] ITAIPU possui três estruturas que compõem as Barragens de Contrafortes: a Barragem Lateral Direita, a Barragem de Ligação Direita e a Barragem de Ligação Esquerda.

Nas juntas das Barragens de Contrafortes, há duas linhas de drenos entre três veda-juntas tipo *Fugenband*®, resultando em torno de 170 drenos.

4.1 Testes anteriores ao enchimento do reservatório

Duas séries de testes foram realizadas nos blocos de gravidade aliviada, 10 a 15 meses antes do enchimento do reservatório [20].

4.1.1 Teste de estanqueidade da cabeça de montante

A estanqueidade da cabeça de montante foi verificada pelo enchimento dos drenos internos com água. Os drenos foram tampados nas suas saídas inferiores e cheios em estágios até uma altura média de 100 m. Da mesma forma, a impermeabilidade das juntas transversais de contração foi testada no período julho – setembro de 1981, vedando as saídas dos drenos de junta próximas à parte inferior e enchendo-as com água até cerca da El. 140. Desta forma, as juntas foram submetidas a cargas hidrostáticas de até 100 m. Qualquer vazamento detectado através das juntas de construção ou áreas do próprio concreto foi vedado com argamassa de epóxi tanto na face de montante como na de jusante das cabeças antes do primeiro enchimento do reservatório.

4.1.2 Teste de pré-carregamento da barragem principal

O espaço entre a barragem e a ensecadeira de montante foi cheio de água até a El. 134,5 em etapas. Isto permitiu a aplicação de 100 m de carga nos blocos centrais e de 120 m nas chavetas da fundação. A partir das medições de deformação da fundação, tensões na barragem e pressões piezométricas e subpressões, foi possível extrapolar a resposta da barragem e da fundação, quando fosse aplicada a carga do reservatório cheio. O teste de pré-carregamento também forneceu uma segunda verificação da impermeabilidade das cabeças. Oito anos após o enchimento do reservatório, as fundações de todos os blocos de gravidade aliviada tinham essencialmente se estabilizado.

4.2 Monitoramento das Estruturas de Concreto

A endoscopia industrial de drenos, feita com o Boroscópio (Figura 7), permite uma inspeção visual que resulta em análises estruturais mais detalhadas. Três casos de aplicação em ITAIPU são mostrados a seguir, onde indicamos com DJ os drenos de junta. A metodologia é a mesma para os drenos de cabeça.



Figura 7 – Boroscópio (endoscópio) para uso em drenos.

As informações dos DJ estão nas Figura 8 e Figura 9. Nelas estão indicados os níveis d'água medidos dentro dos drenos, bem como os pontos onde eles se encontravam obstruídos/obturados. As inspeções (endoscopias) foram realizadas em junho de 2024.

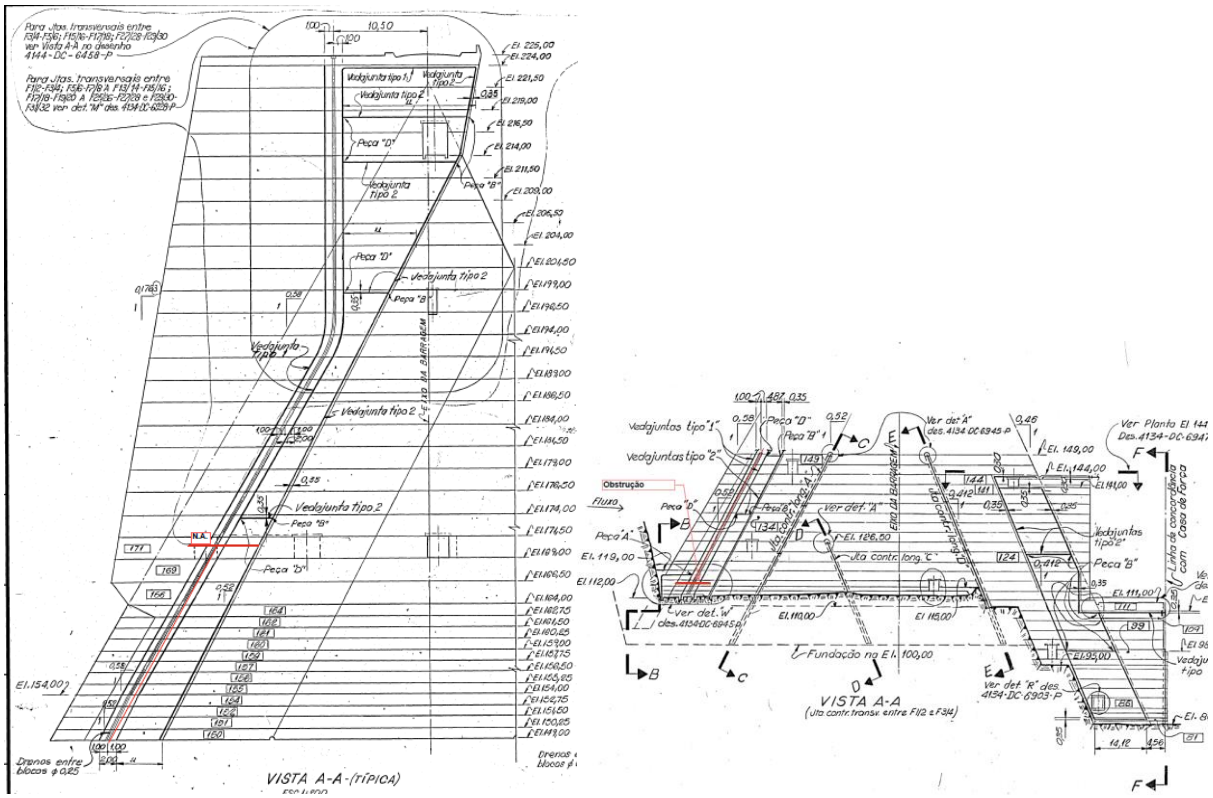


Figura 8 – Perfil da barragem onde se situa o dreno DJ1.

No DJ1, dos 123,5 m de comprimento estimado para os trechos vertical e inclinado, foi possível inspecionar 116,0 m, correspondentes a 93,9% do total. Durante a inspeção, identificou-se uma obstrução localizada a 116,0 m da entrada do dreno (aproximadamente na El. 119,6 m), cuja origem não pôde ser determinada a partir das imagens. Não foram identificados pontos de infiltração de água nas juntas ao longo do trecho inspecionado. Outros aspectos relevantes observados durante o televisionamento foram a restrição da seção hidráulica devido ao acúmulo de eflorescência de carbonato de cálcio aderido às paredes do dreno; falhas de concretagem em alguns trechos, visíveis nas imagens captadas; e o acúmulo de detritos nas paredes dos drenos. A vazão medida na extremidade inferior do dreno era da ordem de 0,75 l/min, não sendo observada influência sazonal em seu comportamento.

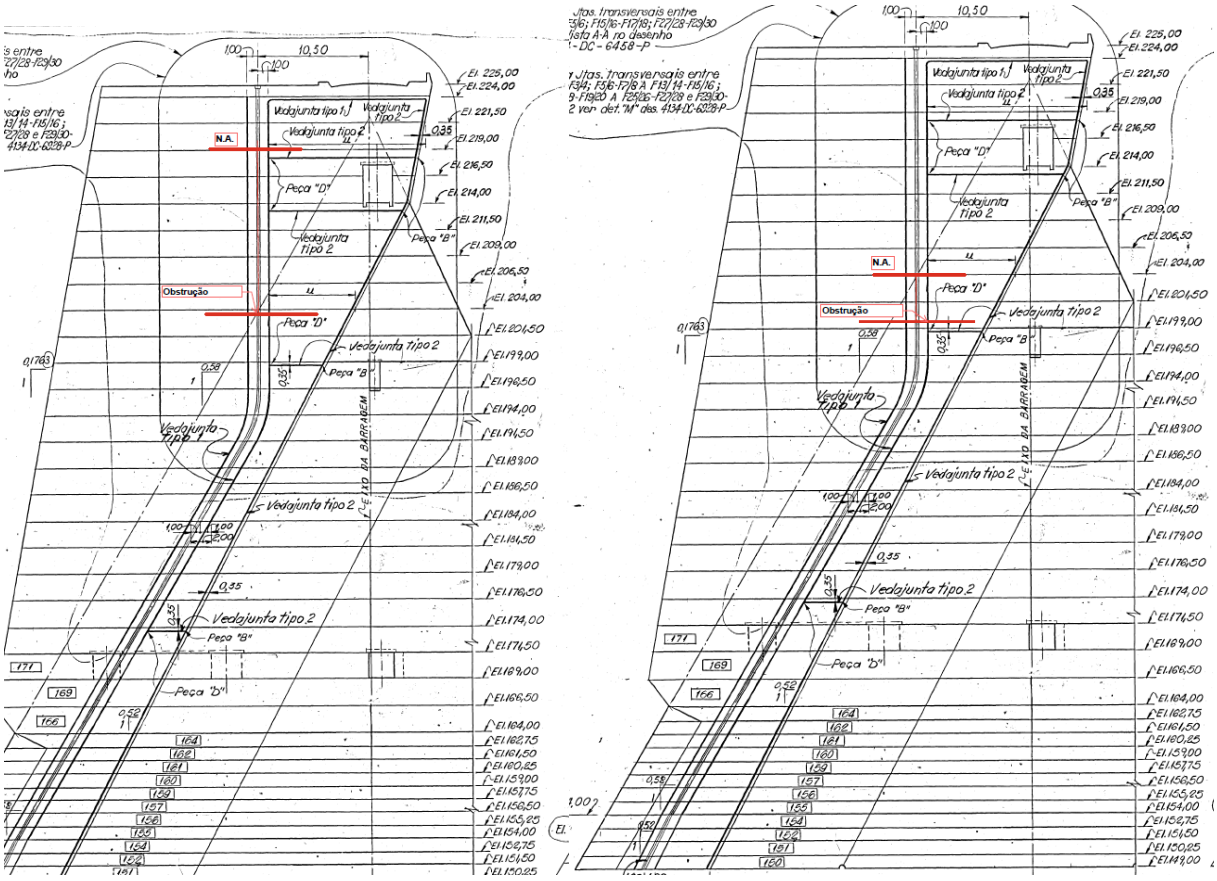


Figura 9 – Perfil da barragem onde se situam os drenos DJ2 (esquerda) e DJ3 (direita).

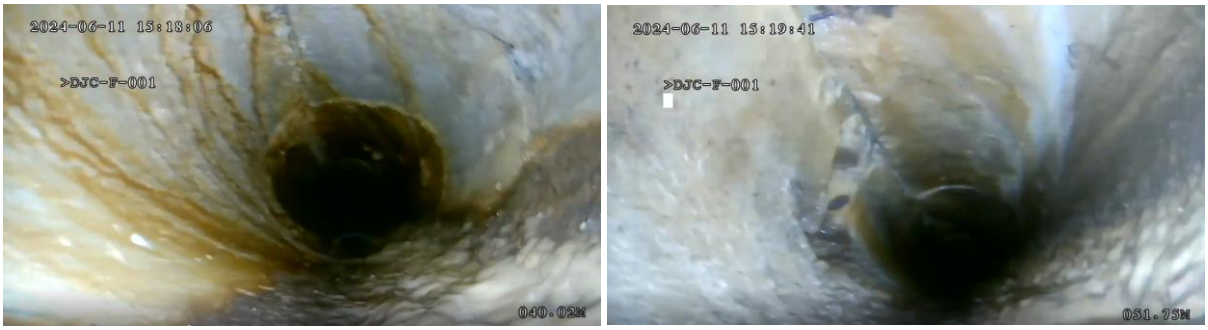


Figura 10 – Acúmulo de carbonatação (esquerda) e falhas de concretagem (direita).

No DJ2, dos 200,1 m de comprimento estimado para os trechos vertical e inclinado, foi possível inspecionar apenas 21,3 m, correspondentes a 10,6% do total. Durante a inspeção, verificou-se que o dreno se encontra obstruído nesta profundidade. No local observou-se acúmulo de material sedimentar depositado (Figura 11), cuja origem não pode ser determinada pela inspeção. Ao longo do trecho inspecionado não foram identificados pontos de infiltração de água nas juntas, tampouco outras anomalias ou aspectos construtivos relevantes que mereçam registro adicional. A vazão medida na extremidade inferior do dreno era da ordem de 0,2 l/min, com certa influência sazonal em seu comportamento.

E no DJ3, dos 193,3 m de comprimento estimado para os trechos vertical e inclinado foi possível inspecionar 25,0 m, correspondentes a 12,9% do total, onde também foi verificada uma obstrução. No local observou-se acúmulo de material fino de aspecto

escuro depositado sobre uma obstrução cuja origem não pode ser determinada (**Figura 12**, esquerda). Ao longo do trecho inspecionado não foram identificados pontos de infiltração de água nas juntas ao longo do trecho inspecionado, mas foi notada a presença de material esbranquiçado cristalino entre 16,0 m e 20,0 m de origem indeterminada (**Figura 12**, direita). A vazão medida na extremidade inferior do dreno DJC-F-010, na data de sua filmagem em junho de 2024, é da ordem de 0,3 l/min, sem influência sazonal em seu comportamento.



Figura 11 – Acúmulo de sedimentos e obstrução no dreno DJ2.



Figura 12 – acúmulo de sedimentos e obstrução (esquerda) e material esbranquiçado (direita), no dreno DJ3.

4.3 Manutenção Preventiva

Campanhas de limpeza de drenos são realizadas a cada 4 anos. Para os drenos de concreto e de junta, a água utilizada é captada do lago através de bombas submersas e lançada no interior dos drenos, com uma mangueira de PEAD 2”. O fluxo de água introduzida é mantido até que ela saia limpa na boca inferior do dreno (aprox. 10 min.). (Figura 13).

Após esta primeira limpeza, prossegue-se com o lançamento da água e vedação temporária da boca de saída dos drenos (Figura 14, esquerda) para enchimento até que a seção da parte horizontal fique totalmente submersa. Este procedimento é monitorado por inspeção pós-lavagem, que permite identificar a área molhada interna ao furo. Após o enchimento da parte horizontal, a vedação é retirada para liberar o fluxo, complementando a limpeza total do dreno. Se ainda houver resíduos que não foram lavados pela água, é feita a limpeza mecânica na parte horizontal utilizando hastes rígidas (Figura 14, direita).



Figura 13 – Água suja no início da limpeza (esquerda) e limpa ao final do processo (direita).



Figura 14 – Vedação parcial da boca do dreno (esquerda) e limpeza mecânica (direita).

4.4 Análises das vazões medidas nos drenos de concreto

Um critério para a observação e tratamento dos drenos de concreto e de junta da Barragem de Itaipu foi definido a partir da experiência em outras barragens. O critério foi baseado na vazão específica (VE) de cada dreno, medida em unidades *Lugeon*, onde se considera uma infiltração uniforme ao longo de todo o comprimento do dreno. A vazão específica e dada por:

$$VE = \mathrm{Q}/(\mathrm{L}\cdot\mathrm{H}/100) \qquad (1)$$

em que:

Q = infiltração do dreno (l/min)

L = comprimento linear do dreno (m)

H = carga correspondente ao desnível entre N.A. do reservatório e a cota média do dreno (m.c.a.)

A unidade Lugeon é equivalente a: 1 Lugeon = 1,0 l/min/100 m.c.a.

A experiência acumulada em outras barragens, fez com que inicialmente fossem consideradas como admissíveis para a barragem de Itaipu, infiltrações específicas da ordem de 0,1 Lugeon. No entanto para a barragem de Itaipu, verificou-se que vazões específicas da ordem de 0,1 Lugeon conduziriam a valores de infiltração muito pequenos, inferiores a 5,0 l/min, principalmente para os blocos mais baixos. O

acompanhamento das vazões nos drenos de junta e de concreto, quando do enchimento do reservatório, revelaram que valores de infiltrações desta ordem de grandeza eram comumente encontrados na obra devido a pequenos defeitos localizados no concreto. Em vista disto, resolveu-se adotar como valor mínimo para acompanhamento dos drenos, valores de infiltrações específicos superiores a 0,2 Lugeon ou infiltrações superiores a 10,0 l/min, considerando-se o maior valor entre os dois. Por outro lado, a experiência adquirida com a observação das infiltrações e com os tratamentos efetuados nos drenos, ao longo de quatro anos e meio, revelou que o tratamento a ser executado num dreno se faz necessário a partir de infiltrações da ordem de 50,0 l/min. Assim, para Itaipu foram propostos valores limites, estabelecendo-se, ainda, uma metodologia para se decidir sobre o tratamento dos drenos.

a) Limite de alerta

Valores de vazão específica superiores a 0,2 Lugeon ou infiltrações superiores a 10,0 l/min., sendo adotado o maior valor entre os dois.

Os drenos que ultrapassarem este limite serão acompanhados através de leituras semanais e caso apresentarem vazões crescentes durante o período de um ano, sem tendência de reversão, deverão ser submetidos a um tratamento.

b) Limites para tratamento

Valores de vazão específica superiores a 2,0 Lugeon ou infiltrações superiores a 50,0 l/min, sendo adotado o maior valor entre os dois.

Ao ser atingido este limite, deverá ser efetuado um levantamento do estado de fissuração do bloco nas imediações do dreno e uma avaliação completa da situação atual do bloco e das possíveis origens das infiltrações (fissuras do concreto, juntas de construção defeituosas, caminhos preferenciais da fundação etc.). Com base nestas informações, será decidido sobre as vantagens da intervenção, através de tratamento específico. Além disso, considerada a sazonalidade das infiltrações, e principalmente sua taxa de incremento no tempo, os limites acima devem ser vistos como alvos e não como valores rígidos. Por outro lado, foi considerado conveniente deixar operante a maior quantidade de drenos internos possíveis.

Nos gráficos a seguir, Figura 15, observa-se que os drenos de junta apresentam vazões muito abaixo dos limites estabelecidos. Isto acontece para praticamente todos os drenos de junta e de cabeça. As causas dos aumentos registrados nesses drenos no período de 2022 a 2024 estão relacionados, provavelmente, à recuperação do nível d'água do lago após um longo período de estiagem nos anos que antecederam, e que promoveram acomodações nas juntas devido a deformações/deslocamentos nas estruturas e o novo enchimento das partes superiores dos drenos, que ficaram secas nesse período. Outro ponto importante é que os drenos dos gráficos abaixo foram limpos (com lavagem por água) em 2021-2022, o que pode ter "liberado" acesso maior da água por caminhos antes não permitidos.

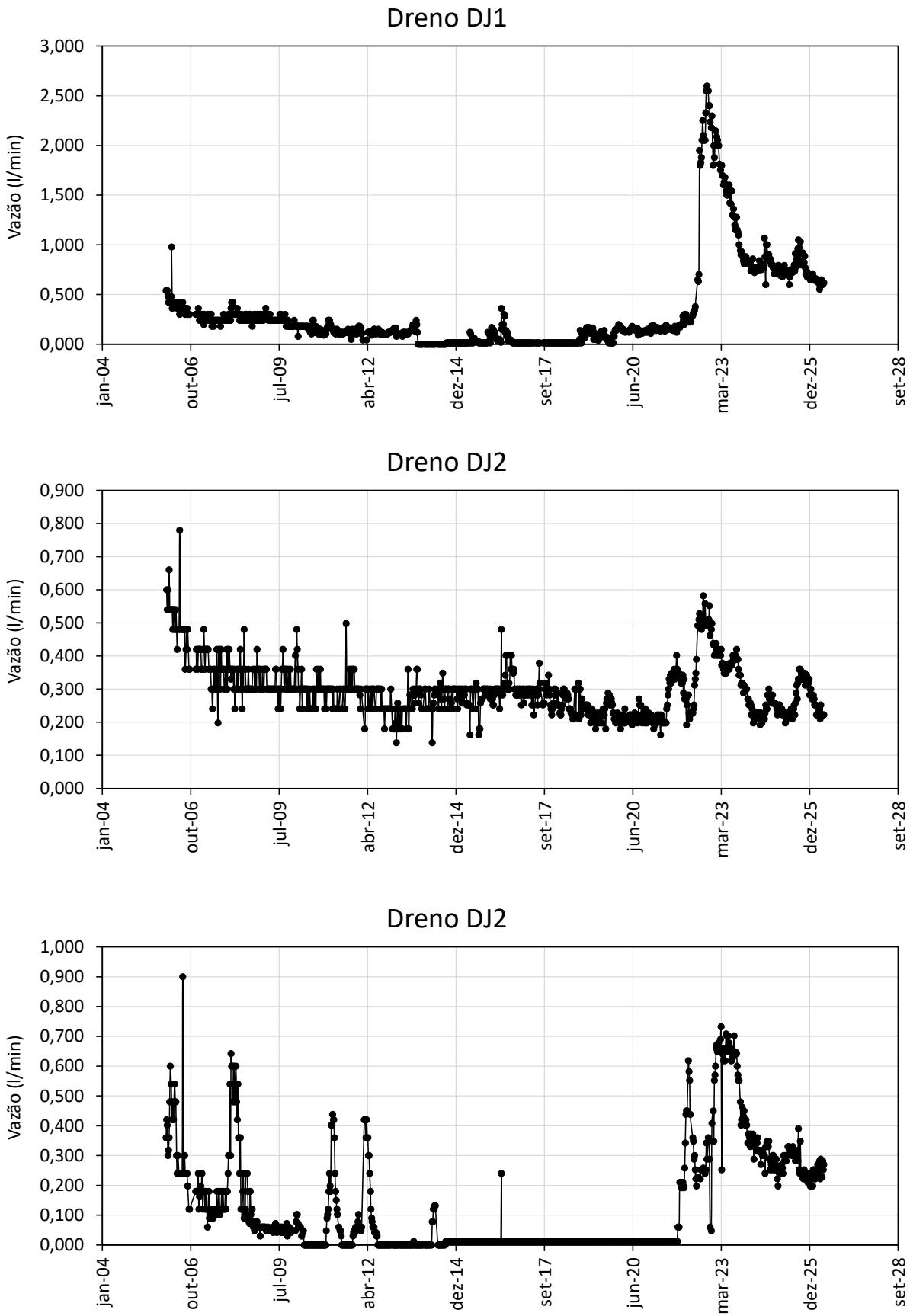


Figura 15 – Comportamentos dos drenos DJ1, DJ2 e DJ3 ao longo dos anos.

Em alguns drenos, são realizadas análises químicas das águas de infiltração e em nenhum caso tem-se registros de aumentos de substâncias que indiquem processos de lixiviação de carbonato de cálcio ou outros elementos constituintes do concreto.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo procurou-se demonstrar, brevemente, a importância da previsão em projeto e da implantação de drenos de cabeça em barragens de concreto – e outras estruturas. Eles são extremamente úteis na avaliação da estanqueidade previamente ao enchimento do lago ou reservatório; nos testes de pré-carregamento das estruturas com o enchimento parcial; nas análises de vazões e infiltrações pós-enchimento (período de operação). Destaca-se que o teste de pré-carregamento também pode fornecer uma segunda verificação da impermeabilidade das cabeças.

Os testes em Itaipu demonstraram a estanqueidade das suas estruturas de concreto, atestando a qualidade da execução da obra. O mesmo ocorreu com os testes de pré-carregamento (informado neste artigo apenas como validador complementar da estanqueidade).

As inspeções por endoscopia indicam que os drenos – tanto de junta quanto de cabeça – estão operando normalmente, embora a estanqueidade restrinja as vazões de infiltrações/percolações que possam ser medidas nas extremidades inferiores desses drenos.

E as análises demonstram, por medidas de vazão e por testes de laboratório de química, que a estanqueidade e a qualidade da obra se refletem em baixos níveis de substâncias que possam causar efeitos deletérios nas estruturas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ITAIPU Binacional pelo fomento ao desenvolvimento de trabalhos científicos e pela disponibilização de informações; e ao colega Jonathas Fabricio de Souza pelo apoio na obtenção de dados.

7. PALAVRAS-CHAVE

Drenos de concreto, Estanqueidade, Durabilidade

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. (1974) **Lessons from Dam Incidents. ICOLD Bulletin**. Paris.

[2] HANSEN, K. D.; REINHARDT, W. G. (1991) **Roller-compacted concrete dams**. New York: McGraw-Hill.

[3] HARZA, L. F. (1949) The Significance of Pore Pressure in Hydraulic Structures. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 114, n. 1, p. 193–214, jan. de 1949.

[4] CREAGER, W. P. *et al.* (1949) Discussion of “Creager on Pore Pressure”. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 114, n. 1, p. 215–268, jan. de 1949.

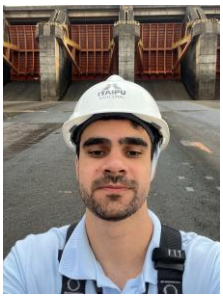
[5] ZIENKIEWICZ, O. C. (1956) The Effect of Pore Pressures on Stresses in Gravity

Dams. **Journal of the Power Division**, v. 82, n. 4, ago. de 1956.
[6] CARLSON, R. W. (1957) Permeability, Pore Pressure, and Uplift in Gravity Dams. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 122, n. 1.
[7] ZEE, C.-H. (1958) Pore Pressure in Concrete Dams. **Journal of the Power Division. Proceeding Paper 1597**, v. 84, n. 2, abr. de 1958.
[8] ZEE, C.-H.; ZEE, R.; ZEE, R. (1988) Pore Pressures in Concrete Dams. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 137, n. 12, 2011.
[9] MASON, J. **Estruturas de aproveitamentos hidrelétricos**. Rio de Janeiro: Editora Campus Ltda.
[10] JULIANI, M. A. *et al.* (1987) Medição de pressão intersticial no concreto das estruturas da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira. In: ANAIS DA CONFERÊNCIA IBERO-AMERICANA SOBRE APROVEITAMENTOS HIDRÁULICOS, 1987, Lisboa. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
[11] JULIANI, M. A. *et al.* (1987) Pressão intersticial das estruturas de concreto da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira. In: ANAIS DO XVII SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 1987, Brasília. Brasília: Comitê Brasileiro de Barragens.
[12] UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR - BUREAU OF RECLAMATION. **Design of Gravity Dams**. Denver, Colorado: 1976.
[13] UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR - BUREAU OF RECLAMATION. **Design Criteria for Concrete Arch and Gravity Dams**. Washington: 1977.
[14] ELETROBRAS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. [Rio de Janeiro]: Eletrobras, 2003.
[15] BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **IS 6512-2019: Criteria for design of solid gravity dams**. New Delhi: BIS, 2019.
[16] NATIONAL ENERGY ADMINISTRATION. **Chinese Standard for the Design of Concrete Gravity Dams. NB/T 35026-2022**. [S.l.]: 2023.
[17] USACE. **Gravity Dam Design. EM 1110-2-2200**. Washington: United States Army Corps of Engineers. Engineering and Design, 1995.
[18] CHAWLA, A. S.; THAKUR, R. K.; KUMAR, A. Optimum Location of Drains in Concrete Dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 116, n. 7, 1990.
[19] ANDRIOLO, F. R. Concreto Adensado com Rolo Vibratório: Sugestões para Projeto e Construção. In: ANAIS DO XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 1985, Belo Horizonte. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens, 1985. p. 79–171.
[20] ITAIPU BINACIONAL. **Itaipu: Usina hidrelétrica – projeto: aspectos de engenharia**. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2009.



Étore FUNCHAL DE FARIA

Eng. Civil pela Univ. do Estado de Minas Gerais - Campus Passos (1995), Mestre em Estruturas e Doutor em Estruturas e Materiais na COPPE-UFRJ, Pós-Doutor em Estruturas e Materiais com ênfase em Segurança de Barragens na Arizona State University - EUA, Pós-Graduado em MBA em Gestão: Projeto pela FGV e Pós-Graduado em Segurança de Barragens pelo IPT (2025). Com experiência em Estruturas de Concreto, Barragens, Instrumentação de Barragens, Tecnologia do Concreto.



Leonardo BRANDALIZE MEDEIROS

Eng. Civil pela Univ. Estadual de Ponta Grossa (2014), com especialização em Segurança de Barragens pelo IPT (2025) e em Gestão de Projetos pela ESALQ (2017). Possui experiência em gestão de obras civis e monitoramento de estruturas, instrumentação, inspeções técnicas e manutenção de barragens de concreto e aterro.



Ricardo Elias MIRANDA ROJAS

Engenheiro Civil (UNA Paraguai, 2012). Especialização em Segurança de Barragens pela Universidad Federal de Bahia, 2019. Membro do Comité Paraguayo de Grandes Presas. Com experiência em projetos de reativação dos sistemas de monitoramento em barragens do Paraguai, propriedade da Administración Nacional de Electricidad (ANDE). Atualmente trabalha na Itaipu Binacional como membro da equipe responsável pelo monitoramento das estruturas civis da barragem.



Francisco RODRIGUES ANDRIOLO

Engenheiro Civil - Estruturas - Escola de Engenharia de São Carlos – USP - (1969) frandriolo80@gmail.com

- De 01/1970 a 06/1975: Atuou no Sistema de Controle de Qualidade na construção da UHE ***Ilha Solteira*** (3.600.000 m^3 de concretos). Atuou como representante da **CESP** junto à **ABNT**;
- De 07/1975 a 09/1980: Responsável pelo Sistema de Controle de Qualidade de Materiais e Concretos, Construção e Instrumentação da ***Itaipu Binacional*** durante a Construção (14.000.000 m^3 de concretos e cerca de 1.500 instrumentos para o monitoramento e análise comportamental);
- Entre 10/1980 e 1984: Atuou na ***Themag Engenharia***- Brasil;

Desde 1982 tem sido Relator e Presidente em Temas de Congressos Técnicos no Brasil e no Exterior;

- Desde 1984 Consultor e Diretor da ***Andriolo Engenharia Ltda*** (**www.andriolo-eng.com**) em mais de 220 obras em 36 países, nos 5

	Continentes, atuando no Planejamento de Instalações de Produção e Construção, e em Patologias e Segurança de Estruturas (Pontes, Viadutos, Túneis, Aeroportos, Portos, Rodovias, Ferrovias, Edifícios e Barragens); ▪ De 1995 a 2003- Representante do **CBDB** junto ao "*Committee on Concrete For Dams"* do **ICOLD** (*International Commission on Large Dams*); ▪ Publicou 11 Livros e mais de 190 publicações em Eventos Técnicos; Membro da **Academia Nacional de Engenharia** desde 2015 (**www.anebrasil.org**)

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.1
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

BOAS PRÁTICAS DE CONTROLE DE EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO (EMM) PARA A CONFIABILIDADE DA INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

Luiz Carlos HIPÓLITO JÚNIOR
Técnico Civil – Cemig

Alexandre Vaz de MELO
Engenheiro Civil MSc. – Cemig

Márcio Pereira WERNECK
Técnico Civil – Cemig

Ananda Assumpção CARNEIRO
Engenheira Civil MSc. – Cemig

RESUMO

Erro! Indicador não definido. A instrumentação de barragens constitui um dos principais pilares para a avaliação contínua da segurança dessas estruturas, permitindo acompanhar seu comportamento ao longo do tempo e identificar precocemente condições anômalas que possam comprometer a estabilidade estrutural e a segurança das pessoas e do meio ambiente. A confiabilidade dos dados obtidos depende não apenas da correta instalação e operação dos instrumentos, mas também da qualidade metrológica dos Equipamentos de Medição e Monitoramento (EMMs) empregados nas leituras de campo. Este trabalho apresenta a aplicação de um Plano de Monitoramento e Medição voltado ao controle sistemático dos EMMs utilizados na instrumentação civil de barragens, contemplando processos de identificação, seleção, calibração, verificação, definição de critérios de aceitação, rastreabilidade, tratamento de não conformidades e validação da consistência dos dados. O plano estrutura a gestão metrológica por meio de cadastro informatizado, análise crítica de certificados de calibração, definição dinâmica de intervalos de calibração e diretrizes para manuseio, preservação e transporte dos equipamentos. A adoção dessas medidas contribui para a redução de incertezas, aumento da confiabilidade das leituras e maior robustez técnica na tomada de decisões relacionadas à segurança de barragens, reforçando a credibilidade das práticas de engenharia perante órgãos reguladores e a sociedade.

Classificação: Direcionado

ABSTRACT

Dam instrumentation is one of the main pillars for the continuous assessment of the safety of these structures, enabling the monitoring of their behavior over time and the early identification of anomalous conditions that may compromise structural stability and the safety of people and the environment. The reliability of the data obtained depends not only on the correct installation and operation of the instruments, but also on the metrological quality of the Measuring and Monitoring Equipment (MME) used in field measurements. This paper presents the application of a Monitoring and Measurement Plan aimed at the systematic control of MMEs employed in civil dam instrumentation, encompassing processes of identification, selection, calibration, verification, definition of acceptance criteria, traceability, treatment of nonconformities, and validation of data consistency. The plan structures metrological management through an computerized registry, critical analysis of calibration certificates, dynamic definition of calibration intervals, and guidelines for handling, preservation, and transportation of equipment. The adoption of these practices contributes to the reduction of measurement uncertainties, increases the reliability of readings, and enhances the technical robustness of decision-making related to dam safety, reinforcing the credibility of engineering practices before regulatory agencies and society.

Classificação: Direcionado

1. INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas de elevada complexidade técnica e alto potencial de impacto social, ambiental e econômico. A segurança dessas estruturas depende da integração entre projeto, construção, operação, manutenção e monitoramento ao longo de toda a sua vida útil. Nesse contexto, a instrumentação civil desempenha papel essencial, pois permite monitorar parâmetros internos e externos que não podem ser detectados apenas por inspeções visuais, como pressões intersticiais, deslocamentos, deformações e vazões.

A coleta sistemática desses dados fornece subsídios fundamentais para a avaliação do comportamento estrutural, a identificação de tendências anômalas e a tomada de decisões preventivas. Entretanto, a utilidade dessas informações está diretamente associada à sua confiabilidade. Leituras imprecisas ou inconsistentes podem mascarar problemas reais ou, inversamente, gerar alarmes falsos, comprometendo a eficácia do sistema de segurança de barragens.

Embora grande parte das discussões sobre instrumentação concentre-se nos sensores e instrumentos instalados nas estruturas, um aspecto frequentemente subestimado é a confiabilidade dos Equipamentos de Medição e Monitoramento (EMMs) utilizados nas leituras de campo. Trenas, sondas, manômetros, relógios comparadores e dispositivos de leitura são componentes críticos do processo de medição e podem introduzir erros significativos caso não sejam adequadamente controlados.

Dessa forma, a implementação de um Plano de Monitoramento e Medição, com foco na gestão metrológica dos EMMs, torna-se uma estratégia fundamental para assegurar a qualidade dos dados da instrumentação e fortalecer o sistema de segurança de barragens.

O presente artigo apresenta o plano de monitoramento e medição desenvolvido pela área de Segurança de Barragens da Cemig de forma criteriosa, fundamentado em boas práticas de monitoramento de instrumentação de estruturas e na experiência acumulada dos profissionais que integraram o corpo técnico da empresa ao longo dos anos. Ressalta se que esse plano não é estático, sendo continuamente aperfeiçoado por meio de um processo de melhoria contínua.

2. REFERENCIAL NORMATIVO E FUNDAMENTOS METROLÓGICOS

A gestão da confiabilidade das medições deve estar alinhada a normas técnicas consolidadas que estabelecem requisitos para sistemas de gestão da qualidade e da medição. A norma ISO 9001 [1] enfatiza o controle de processos que afetam a qualidade dos produtos e serviços, incluindo aqueles relacionados à medição e monitoramento. Já a ISO 10012 [2] estabelece diretrizes específicas para sistemas de gestão de medição, abordando temas como calibração, verificação, rastreabilidade, controle de registros e análise de incertezas.

No âmbito da engenharia de barragens, entidades técnicas e regulatórias reforçam a necessidade de instrumentação confiável como elemento essencial para a segurança dessas estruturas. As boas práticas recomendadas por comitês técnicos

Classificação: Direcionado

especializados destacam que a instrumentação deve ser acompanhada por procedimentos operacionais padronizados e por sistemas de controle que assegurem a qualidade dos dados ao longo do tempo. Alinhada a essas diretrizes, a ABNT NBR 17189:2024 [3] estabelece requisitos gerais para a calibração de instrumentos de auscultação.

Além das normas nacionais e internacionais, procedimentos operacionais internos assumem papel estratégico ao traduzir esses requisitos normativos para a realidade operacional das barragens, estabelecendo responsabilidades, fluxos de trabalho e critérios técnicos aplicáveis ao contexto específico de cada organização.

3. PLANO DE MONITORAMENTO E MEDIÇÃO

O Plano de Monitoramento e Medição constitui o eixo central da gestão metrológica dos EMMs utilizados na instrumentação de barragens. Segundo o procedimento Cemig [4], o plano define um conjunto estruturado de diretrizes e procedimentos que abrangem todo o ciclo de vida dos equipamentos, desde a seleção até o descarte.

Todos os EMMs são cadastrados em sistema informatizado específico, no qual são registradas informações essenciais, como identificação única, tipo de equipamento, grandeza medida, faixa de medição, método de controle metrológico, critérios de aceitação, intervalos de calibração e histórico de conformidade. Esse cadastro permite rastrear cada equipamento de forma inequívoca, garantindo transparência e controle ao longo do tempo.

3.1 Seleção e identificação dos EMMs

Todos os EMMs referentes à leitura da instrumentação civil de barragens e suas áreas de abrangência fazem parte do Plano de Monitoramento e Medição de EMM. São gerenciados pelo controlador de EMM designado e estão listados na Tabela 1, onde consta a sigla referente ao EMM e a forma de controle definido para cada tipo.

Tabela 1 – EMM para auscultação de barragens controladas

EMM	Sigla	Tipo de Controle
Tanque/régua (medidor de vazão)	**TR**	Verificação interna
Sonda piu	**SP**	Verificação interna
Relógio comparador	**RC**	Calibração externa
Coordinômetro micrométrico	**CM**	Calibração externa
Coordinômetro óptico	**CO**	Calibração externa
Réguas e trenas de fibra de vidro/metálicas de qualquer tamanho	**RT**	Verificação interna
Termômetro para temperatura ambiente	**TA**	Calibração externa
Dispositivos de leitura de inclinômetros de deflexão	**CD**	Calibração externa
Trena pescador para inclinômetro de recalque	**TP**	Verificação interna
Cabo, trena, medidor de recalque magnético	**TM**	Verificação interna
Recipiente graduado	**GR**	Verificação interna
Manômetros	**MA**	Calibração externa

Classificação: Direcionado

EMM	Sigla	Tipo de Controle
Caixa de leitura para instrumentos pneumáticos	**CP**	Calibração externa
Caixa de leitura universal (instrumentos elétricos e de corda vibrante)	**LU**	Calibração externa
Cabos graduados	**CG**	Verificação interna
Cronômetros	**CR**	Verificação interna

A seleção dos EMMs é realizada com base nas grandezas físicas a serem monitoradas e nas tolerâncias exigidas para cada parâmetro. A resolução do equipamento deve ser compatível com a sensibilidade requerida, evitando tanto medições imprecisas quanto o uso de equipamentos excessivamente sofisticados para aplicações simples.

A identificação padronizada dos EMMs assegura sua correta associação às instalações e aos instrumentos de auscultação. Essa identificação física, aliada ao registro no sistema, reduz o risco de uso indevido, trocas não controladas ou perda de rastreabilidade.

Para identificar, os EMMs são marcados por meio de etiqueta ou outro meio adequado, tal como gravação por meio de rotulador ou drimel. A identificação é formada por 7 a 8 caracteres, conforme a Figura 1:

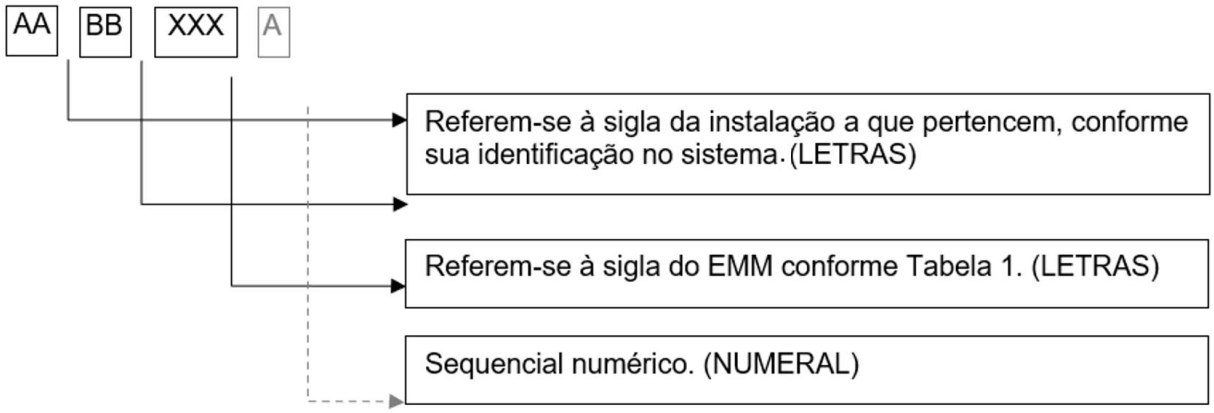


Figura 1 – Padronização de Identificação do EMM

Exemplo1: Sonda Piu pertencente à UHE Três Marias: TMSP001.

Exemplo 2: Os EMMs que compõem a caixa de leitura dos piezômetros pneumáticos, de Nova Ponte:

NPCP001 (manômetro principal);

NPCP001A (um dos manômetros auxiliares).

O histórico de cada EMM é registrado na Ficha de Controle do EMM (Figura 2) e são armazenados em sistema eletrônico de gestão de documentos, com rastreabilidade garantida.

Classificação: Direcionado

FICHA DE CONTROLE DO EMM					Classificação: Rev:a
EMM:			N.º Identificação:		
Fabricante:		Tipo/Modelo:		Nº de Série	
Localização do Manual :					
HISTÓRICO DE CALIBRAÇÃO/VERIFICAÇÃO					
Data Calibração/Verifica		N.º do Certificado	Emitente do Certificado	Resultado	Responsável
Última	Próxima				
Data	HISTÓRICO DE MANUTENÇÃO				

Figura 2 - Ficha de Controle do EMM

3.2 Calibração e verificação metrológica

Os EMMs são classificados conforme o rigor metrológico necessário à sua aplicação. Equipamentos de maior precisão são submetidos à calibração externa em laboratórios especializados, preferencialmente acreditados ou com padrões rastreáveis. Já equipamentos cuja aplicação admite maior flexibilidade são submetidos à verificação interna, realizada por equipes treinadas, seguindo procedimentos específicos.

Todas as calibrações e verificações são registradas em formulários, e os certificados de calibração externa passam por análise crítica, assegurando que atendam aos requisitos técnicos definidos. Essa análise é fundamental para evitar a aceitação automática de certificados que não garantam a confiabilidade necessária às medições.

3.2.1 Verificação ou Calibração Interna

Entende-se por verificação (ou Calibração Interna) o processo de calibração realizado pela própria equipe de segurança de barragens.

Os EMMs que serão calibrados/verificados internamente são aqueles que não necessitam de um critério rigoroso para sua calibração, uma vez que sua utilização é específica para o fim ao qual foi determinado. Além disso, os equipamentos que se

enquadram nesta classificação são EMMs onde pequenas avarias não causam erros significativos no resultado das medições e a habilidade do leiturista ao manuseá-lo é mais significativa que os erros inerentes ao EMM.

Os EMMs que se enquadram neste item são verificados seguindo procedimentos específicos para cada tipo de EMM. Os procedimentos para verificação interna dos EMMs classificados com este tipo de controle são: Sonda Piu, Tanque/Régua de Medidores de vazão, Régua e Trenas menores do que 2 metros, trenas e cabos graduados, Recipientes graduados e cronômetros. Os formulários de registros de verificação interna (Figura 3) devem ser preenchidos pelo responsável pela verificação. Logo em seguida deverão ser analisados e armazenados de forma organizada junto a ficha do EMM pelo controlador dos EMMs, de forma a atender aos seus critérios de aceitação.

	GERÊNCIA DE SEGURANÇA DE BARRAGENS E MANUTENÇÃO CIVIL	Classificação: Reservada Revisa
	REGISTRO DE VERIFICAÇÃO INTERNA TIPO 1	CERTIFICADO Nº

Características do EMM	
Descrição:	Nº Série:
Fabricante:	Identificação:
Tipo/Modelo:	Localização:
Informações Técnicas do EMM	
Faixa de Medição:	Graduação:
Faixa de Utilização:	Resolução:
Exatidão:	Erro (tolerância):
Procedimentos	
Verificação executada conforme:	Faixa calibrada:
	Próxima verificação:
Padrão Utilizado na Verificação	
Descrição:	Certificado:
Fabricante:	Validade:

Verificação

Indicação	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Média	Tendência (m)	Erro aceitável (+/-) em m	Resultado
Sensor em perfeito funcionamento		sim ☐		não ☐			
Sonda sem emendas		sim ☐		não ☐			

Observação

Status Final		
Resultado Final:	Medição efetuada por:	Aprovado por:
DATA	Responsável / Número Pessoal	Responsável / Número Pessoal

Figura 3 – Formulário de Registros de Verificação

3.2.2 Calibração externa

Entende-se por calibração externa aquela realizada por laboratórios de metrologia especializados. A calibração externa é indicada para EMMs de melhor resolução, em que pequenos desajustes podem trazer prejuízo no resultado das medições e para os que não podem ser calibrados internamente.

Os laboratórios contratados para efetuar a calibração dos EMMs deverão pertencer à Rede Brasileira de Calibração (RBC) ou possuir padrões rastreáveis pela RBC. A exceção se faz aos EMMs: Dispositivos de leitura de inclinômetros de deflexão, Coordinômetro óptico, Caixa de leitura universal (instrumentos elétricos e de corda vibrante), que poderão ser encaminhados a outros laboratórios, pois não existe no

Classificação: Direcionado

país laboratórios com padrões rastreáveis pela RBC para efetuar calibração nestes EMMs.

Os EMMs calibrados externamente devem ter seus certificados de calibração analisados seguindo o checklist de Análise do Certificado de Calibração Externa (Figura 4).

CHECK-LIST DA ANÁLISE DE CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO EXTERNA

Equipamento Calibrado:	Código:
N.º do Certificado:	Emitido por:

A - Itens Avaliados	Sim	Não
1- A Calibração foi realizada em órgão pertencente a RBC?		
1.1 - Caso o Orgão não pertença a RBC:		
a) Os certificados dos padrões utilizados estão disponíveis?		
b) A data de calibração está dentro da validade do certificado do padrão?		
c) A resolução do padrão utilizado é compatível com o equipamento calibrado?		
2- O Certificado contém:		
a) Número ou nome da norma ou procedimento utilizado para calibração?		
b) Identificação que permita relacionar de forma única o equipamento calibrado?		
c) Data da realização da calibração ou emissão do certificado?		
d) Valores da calibração cobrindo toda a faixa de utilização do equipamento?		
e) Identificação do responsável pela calibração?		
f) Os detalhes sobre quaisquer manutenções, tais como: assistência técnica, ajustes, reparos e modificações realizadas;		
g) As condições ambientais (temperatura e umidade relativa)?		
h) Clara identificação do final do certificado de calibração?		
3- Os valores encontrados na calibração estão dentro do especificado para o equipamento, conforme indicado no Plano de Calibração?		

B - Providências Para Sanar as Irregularidades Encontradas

C - Informações para Avaliação do Subcontratado
1) Qualidade da embalagem:
2) Estado físico do equipamento:
3) Limpeza do equipamento:
4) Conformidade dos itens requisitados no certificado:
5) Conformidade dos documentos anexados ao certificado:
6) Data prevista para entrega do equipamento:
7) Data real de entrega do equipamento:

Resultado Final:	Certificado: ☐ Aprovado ☐ Aprovado com ressalva ☐ Reprovado		
	Instrumento: ☐ Aprovado ☐ Aprovado com ressalva ☐ Reprovado ⇒ **Tratamento de EMM REPROVADO**		
Analisado por:		Visto:	Data:

Figura 4 – Checklist de Análise do Certificado de Calibração Externa

Considera-se aprovado o certificado que atender a todos os requisitos dos Itens “1” e “2” “a”, “b”, “c”, “d”, “e”, “f”, “g” e “h” do checklist.

3.3 Intervalos de calibração

Os intervalos de calibração são definidos considerando recomendações do fabricante, condições de uso, histórico de desempenho e experiência do corpo técnico. Esses

Classificação: Direcionado

intervalos são ajustados dinamicamente com base nos resultados obtidos ao longo dos ciclos de calibração, adotando-se uma abordagem baseada em evidências.

De forma geral, os intervalos de calibração poderão ser reajustados após 3 ciclos de calibração/verificação usando a seguinte diretriz:

- Todas OK - dobrar o intervalo;

- Deficiência em 1 das 3 calibrações/verificações - manter o intervalo

- Deficiência em 2 das 3 calibrações/verificações - reduz o intervalo à metade;

- Deficiência em 3 das 3 calibrações/verificações - reclassificar, segregar ou descartar o EMM.

A periodicidade de calibração/verificação dos EMMs poderá ser antecipada devido a eventuais problemas ou irregularidades observados pelos usuários durante suas atividades.

Todo EMM poderá ser usado se estiver dentro do prazo de validade de sua calibração ou verificação. Também será admitido o uso se o equipamento tiver aprovação com ressalva — em caráter temporário, até a aquisição de um novo — ou, ainda, mediante autorização do engenheiro responsável pela análise de instrumentação da estrutura ou do Controlador dos EMMs, caso a calibração esteja vencida, desde que haja o devido registro em ficha. De todo modo, deve-se sempre prever um equipamento sobressalente para realizar as leituras enquanto o principal estiver em calibração.

3.4 Critérios de aceitação de calibração

Os critérios de aceitação dos EMMs são definidos previamente e cadastrados no plano de calibração. Apenas equipamentos que atendem plenamente a esses critérios são considerados aptos para uso. Em situações específicas, pode ser admitida a aprovação com ressalva, desde que tecnicamente justificada e registrada.

Os critérios considerados no Plano de Monitoramento são:

- Faixa de medição: a faixa de medição de um equipamento é o intervalo de valores mínimos e máximos dentro do qual o equipamento consegue medir corretamente uma grandeza física, mantendo a precisão e a confiabilidade especificadas pelo fabricante;

- Faixa de utilização: a faixa de utilização de um equipamento de medição é o intervalo de valores dentro da faixa de medição no qual o equipamento é usado de forma contínua, segura e confiável, mantendo o desempenho adequado ao longo do tempo;

- Graduação: representa o menor incremento indicado na escala do instrumento, normalmente visível no mostrador (analógico) ou definido no passo de leitura (digital);

- Resolução: A resolução de um equipamento de medição é a menor variação da grandeza medida que o instrumento consegue detectar ou indicar;

- Tolerância (T): A tolerância é a variação total permitida para as dimensões ou valores de uma grandeza. Define os limites aceitáveis (máximo e mínimo) entre os quais o valor real medido deve se encontrar;

- Exatidão: é o grau de proximidade entre o valor medido pelo instrumento e o valor real (ou verdadeiro) da grandeza medida;

Classificação: Direcionado

- Erro (E): o erro de um equipamento de medição é a diferença entre o valor indicado pelo instrumento e o valor verdadeiro (ou de referência) da grandeza medida;

- Incerteza (I): é o parâmetro que quantifica a dúvida associada ao resultado de uma medição. Indica o quanto o valor medido pode variar em torno do resultado apresentado, considerando todas as fontes de erro conhecidas.

A Tabela 2 exemplifica os parâmetros e critérios de aceitação que podem ser utilizados para EMMs:

Tabela 2 – Critérios de aceitação de calibração por tipo de EMM (exemplo)

EMM	Faixa de medição	Faixa de utilização	Graduação	Resolução	Tolerância	Exatidão	Critério de aceitação
RÉGUA PARA MEDIDORES DE VAZÃO TRIANGULAR	0 a 50 cm (variável)	0 a 25 cm (variável)	0,5 cm	< 0,25 cm	± 0,5 cm	$\leq \frac{1}{2} T \pm 0{,}5\text{cm}$ Então ≤ ± 0,25 cm	$\lvert E\rvert + \lvert I\rvert \leq \frac{1}{2} T$ então ≤ ± 0,25 cm
RELÓGIO COMPARADOR	0 a 20 mm, 0 a 25 mm ou 0 a 30 mm	0 a 20 mm, 0 a 25 mm ou 0 a 30 mm	0,01 mm	< 0,01 mm	± 0,075 mm	$\leq \frac{1}{3} T \pm 0{,}75\text{mm}$ Então ≤ ± 0,025 mm	$\lvert E\rvert + \lvert I\rvert \leq \frac{1}{3} T$ Então ≤ ± 0,025 mm
SONDA PIU	0 a 100 m (variável)	0 a 60 m (variável)	0,1; 0,2 e 0,5 cm	0,1; 0,2 e 0,25 cm	± 1,5 cm/m	$\leq \frac{1}{3} T \pm 1{,}5\text{cm/m}$ Então ≤ ± 0,5cm/m	$\lvert E\rvert + \lvert I\rvert \leq \frac{1}{3} T$ Então ≤ ± 0,5cm/m
TRENA PARA RECALQUE TIPO IPT	0 a 1,5 m (variável)	0 a 1,15 m (variável)	0,1 cm	0,1 cm	± 0,6 cm totais	$\leq \frac{1}{3} T \pm 0{,}6\text{cm}$ Então ≤ ± 0,2cm totais	$\lvert E\rvert + \lvert I\rvert \leq \frac{1}{3} T$ Então ≤ ± 0,2 cm
COORDINÔ-METRO ÓPTICO	0 a 300 mm (x) 0 a 150 mm (y)	0 a 300 mm (x) 0 a 150 mm (y)	0,1 mm	0,1 mm	± 1,5 mm	$\leq \frac{1}{3} T \pm 1{,}5\text{mm}$ Então ≤ ± 0,5mm	$\lvert E\rvert + \lvert I\rvert \leq \frac{1}{3} T$ Então≤ ± 0,5 mm
CONSOLE DE LEITURA DE CORDA VIBRANTE	Freq: 400 a 6.000 Hz Temp: -50 ºC a +150 ºC	Freq: 400 a 6.000 Hz Temp: 0 ºC a +45 ºC	Freq: 0,1 Hz Temp: 0,1 ºC	Freq: 0,1 Hz Temp: 0,1 ºC	Freq: ± 3% da leitura	Freq: $\leq \frac{1}{3} T \pm 3\%$ Então ≤ ± 1,5% da leitura	$\lvert E\rvert + \lvert I\rvert \leq \frac{1}{3} T$ Então≤ ± 1,5% da leitura
MANÔMETRO	0 a 1 kgf/cm²	0,25 a 0,75 kgf/cm²	0,02 kgf/cm²	0,02 kgf/cm²	± 0,06 kgf/cm²	≤ 2% F.E.	$\lvert E\rvert + \lvert I\rvert \leq \frac{1}{3} T$ Então ≤ ± 0,02kgf/cm²
CRONÔMETRO	23Horas5 9'59"	0 a 1 minuto	1/100 segundos	1/100 segundos	± 4 segundos em 1minuto	$\leq \frac{1}{3} T \pm 4\text{ seg}$ Então ≤ ± 2 seg / min	$\lvert E\rvert + \lvert I\rvert \leq \frac{1}{3} T$ Então ≤ ± 2 seg/min
RECIPIENTES GRAUDUADOS	0 a 1000 ml (variável)	(variável)	50 ml	≤ 25 ml	± 50 ml/1000ml	$\leq \frac{1}{3} T \pm 50\text{ml}$ Então ≤ ± 25ml/1000ml	$\lvert E\rvert + \lvert I\rvert \leq \frac{1}{3} T$ Então ≤ ± 25ml/1000ml
LEITORA E TORPEDO DE INCLINÔMETRO DE DEFLEXÃO	- 53° a + 53°	- 30° a + 30°	10" arco/0,5 metro	10" arco/0,5 metro ou ± 0,025mm/500mm	± 1'/metro ou ±0,150mm/m	≤ ± 6mm/30m ou ±0,075mm/m ou A0+A180 e B0 +B180 ≤ ± 4000 dígitos ou ±0,30% FSR (Faixa de medição)	$\lvert E\rvert + \lvert I\rvert \leq \frac{1}{2} T$ Então ≤ ± 30 seg/metro ±0,075mm/m ou ± 2000 dígitos ou 0,15% FSR
NÍVEL ELETRÔNICO	0 m a 100m	0 m a 5m	1mm	1mm	± 10mm/km	≤ 1,5mm/km	$\lvert E\rvert + \lvert I\rvert \leq \frac{1}{3} T$ Então ≤ ± 3,33mm/km
CONSOLE DE LEITURA PARA MEDIDAS DE RESISTÊNCIA	Resistência: 400 a 6.000 Ω	Resistência: 400 a 6.000 Ω	Resistência: 0,1 Ω	Resistência: 0,1 Ω	Resistência: ± 3% da leitura	Resistência: E ≤ 1/3 x ± 3% ≤ ± 1,50% da leitura	$\lvert E\rvert + \lvert I\rvert \leq \frac{1}{3} T$ Ou ≤ ± 1,5% da leitura

3.5 Manuseio, preservação e transporte

O desempenho metrológico dos EMMs depende também de práticas adequadas de manuseio, preservação, armazenamento e transporte. O plano estabelece diretrizes

Classificação: Direcionado

específicas para essas atividades, considerando as condições ambientais e operacionais das barragens. A adoção dessas práticas reduz a ocorrência de danos e desvios metrológicos, contribuindo para a estabilidade das medições. A Tabela 3 exemplifica boas práticas de preservação dos EMMs.

Tabela 3 – Tabela de Preservação, Armazenamento e Transporte de EMM

Equipamento	**Preservação**	**Armazenamento**	**Transporte**
Tanque/Régua	Manter o tanque limpo e a régua nivelada	Barragem terra	Em caixa ou saco plástico, com cuidado para não danificar.
Manômetro	Manter no local de instalação	Local de instalação	Em caixa apropriada
Relógio Comparador	Manter acondicionado na caixa apropriada	Escritório da equipe de monitoramento	Em caixa apropriada
Sonda PIU	Manter limpa e enrolado no carretel	Escritório da equipe de monitoramento	Enrolada no carretel
Console de Leitura Universal	Manter acondicionado na caixa apropriada	Escritório da equipe de monitoramento	Em caixa apropriada
Cronômetro	Manter em local apropriado	Escritório da equipe de monitoramento	Em caixa apropriada
Régua/Trena	Manter em local apropriado	Escritório da equipe de monitoramento	Em caixa ou saco plástico, com cuidado para não danificar.
Torpedo de Inclinômetro de Deflexão	Manter acondicionado na caixa apropriada	Escritório da equipe de monitoramento	Em caixa apropriada
Cabo de Inclinômetro de Deflexão	Manter limpa e enrolado no carretel	Escritório da equipe de monitoramento	Enrolado
Caixa de leitura para instrumentos Pneumáticos	Manter acondicionado na caixa apropriada	Escritório da equipe de monitoramento	Em caixa apropriada

3.6 Tratamento de não conformidades

EMMs que apresentam não conformidades, como falhas de calibração, danos físicos ou uso fora do intervalo estabelecido, devem ser imediatamente identificados e segregados.

Classificação: Direcionado

O plano deve definir procedimentos para ajuste, recalibração, substituição ou descarte desses equipamentos, bem como para a análise do impacto potencial das medições realizadas com EMMs não conformes.

4. CONCLUSÕES

A experiência demonstrada evidencia que a confiabilidade da instrumentação de barragens não depende exclusivamente da tecnologia dos instrumentos instalados, mas do conjunto integrado de práticas que envolvem gestão metrológica, procedimentos operacionais e análise técnica dos dados. O Plano de Monitoramento e Medição atua como elemento estruturante desse sistema, reduzindo incertezas, aumentando a robustez das análises e fortalecendo a cultura de segurança de barragens.

Além disso, a rastreabilidade e a documentação sistemática conferem maior transparência ao processo, facilitando auditorias, fiscalizações e revisões periódicas de segurança.

A aplicação de um Plano de Monitoramento e Medição voltado à gestão dos Equipamentos de Medição e Monitoramento mostrou-se fundamental para assegurar a confiabilidade dos dados da instrumentação de barragens. A estruturação dos processos de seleção, calibração, verificação, aceitação, rastreabilidade e tratamento de não conformidades contribui significativamente para a qualidade das medições e para a segurança estrutural, operacional e ambiental das barragens.

Essas práticas reforçam o papel da gestão metrológica como pilar estratégico da segurança de barragens e como instrumento essencial para a credibilidade da engenharia perante a sociedade e os órgãos reguladores.

Esse tratamento sistemático evita a propagação de erros e assegura a integridade do banco de dados da instrumentação.

5. PALAVRAS-CHAVE

EMM, Confiabilidade, Instrumentação, Calibração, Segurança de barragens

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

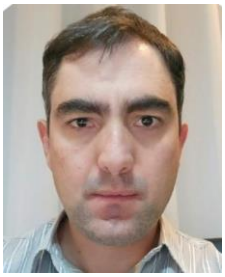
[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2015) - NBR ISO 9001:2015 – Sistemas de gestão da qualidade

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2004) - NBR ISO 10012:2004 – Sistemas de gestão de medição – Requisitos para processos de medição e equipamentos de medição.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2024) - NBR 17189:2024 – Instrumentação em barragens - Requisitos.

[4] CEMIG (2024) - PO-AGSB-0105b – Procedimento Operacional - Coleta e confiabilidade de dados da instrumentação.

Classificação: Direcionado

	**Luiz Carlos HIPÓLITO JÚNIOR** Técnico de Edificações e Engenheiro de Produção Civil pela FUMEC-MG, com pós-graduação em Engenharia de Segurança de Barragens pelo IDD Paraná. Atua desde 2016 na Cemig como Técnico de Segurança de Barragens com monitoramento e manutenção de usinas hidrelétricas. Atualmente trabalha com instrumentação e gestão de ativos
	**Alexandre Vaz de MELO** Engenheiro Civil e Mestre em Geotecnia pela UFMG, com linha de pesquisa em Análises de Risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento. Possui mais de 20 anos de experiência na avaliação do comportamento de barragens e estruturas civis de geração. Atua como Engenheiro de Segurança de Barragens na Cemig GT e Professor no IEC PUC Minas nas especializações de Engenharia de Barragens e de Gestão de Risco de Desastres e Continuidade de Negócios.
	**Márcio Pereira WERNECK** Engenheiro. 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.
	**Ananda Assumpção CARNEIRO** Engenheira civil e mestre em geotecnia pela Universidade Federal de Viçosa. É Engenheira de Segurança de Barragens da CEMIG, onde atua na equipe de instrumentação e tecnologia. Possui experiência em mineração, tendo atuado como Engenheira Geotécnica na Pimenta de Ávila Consultoria e como estagiária e trainee na SAFF Engenharia. Além disso, foi treinadora associada da Seequent, ministrando cursos sobre softwares de modelagem geotécnica**.**

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.1
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

UHE IRAPÉ:
PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO COM FOCO NOS MODOS DE FALHA

Luiz Filipe Venturi VIANNA
Engenheiro Civil MSc. – Cemig

Teresa Cristina FUSARO
Engenheira Civil MSc. – Fusaro Engenharia e Consultoria Ltda.

Alex Martins CALCINA
Engenheiro Civil – Intertechnne Consultores

Luiz Antônio MAIA Júnior
Engenheiro Civil Esp. – Cemig

RESUMO

A barragem da usina hidrelétrica de Irapé, é constituída por uma seção de núcleo de solo com espaldares em enrocamento. Trata-se da Barragem mais alta já construída no Brasil (H=210 m), a qual representou desafios de engenharia em decorrência da sua altura elevada, formato variável e encaixado do vale do rio Jequitinhonha e a presença de minerais de sulfetos existentes no maciço rochoso local.

Tais condicionantes levaram à adoção de soluções de engenharia para mitigar os riscos associados ao comportamento dessa estrutura, tanto relacionados a questões de projeto e de construção, bem como os decorrentes de monitoramento do desempenho da barragem.

O presente artigo apresenta o conceito adotado para o plano de instrumentação, que visou confirmar as hipóteses adotadas para o projeto, principalmente quanto ao comportamento de arqueamentos, concentrações e alívios de tensão, particularmente aqueles associados a um potencial comportamento que pudesse resultar em riscos de erosão interna.

Nesse contexto serão abordadas questões relativas aos tipos de instrumentos instalados e sua função, face às características geométricas tanto do vale quanto dos materiais aplicados no aterro da barragem.

Por fim, serão apresentados ainda os aspectos mais importantes sobre o comportamento da barragem baseado no monitoramento de instrumentação, passados 20 anos do início de operação da Usina.

ABSTRACT

The dam at Irapé hydroelectric power plant consists of a rockfill structure with clay core. It is the highest dam ever built in Brazil (H=210 m), and posed many engineering challenges due to its height, the variable and enclosed shape of the Jequitinhonha river valley, and the presence of sulfide minerals in the local rock mass.

These constraints led to the adoption of engineering measures to mitigate the risks associated with the behavior of this structure, including those related to design and construction issues, as well as those concerning monitoring the dam performance.

This article presents the concept adopted for the instrumentation plan, which aimed to confirm the hypotheses adopted in the project, mainly regarding the behavior of arching, concentrations and reliefs of stress, particularly those associated with a potential behavior that could result in internal erosion risks.

In this context, issues related to the types of instruments installed and their function, considering the geometric characteristics of both the valley and the materials used in the dam's embankment, will be addressed.

Finally, the most important aspects of the dam's behavior based on instrumentation data will be presented, after 20 years of the powerplant's operation.

1 A BARRAGEM DE IRAPÉ

A usina hidrelétrica de Irapé, ou usina Presidente Juscelino Kubitschek, está localizada no rio Jequitinhonha, em Minas Gerais, nos municípios de Grão Mogol em sua margem esquerda e Berilo, na margem direita. Foi inaugurada em julho de 2006, possuindo potência instalada de 399 MW, distribuída em 3 unidades geradoras.

Está situada na região mais desfavorecida do estado de Minas Gerais, no Vale do Rio Jequitinhonha, e sua operação é de suma importância para o desenvolvimento socioeconômico dessa região.

A Intertechne Consultores S.A. e a Leme Engenharia foram responsáveis pelo projeto, sendo a CEMIG a gestora do empreendimento. A construção se deu por um consórcio formado pelas empresas Construtora Andrade Gutierrez, Construtora Norberto Odebrecht, Ivaí Construtora de Obras e Hochtief Int. do Brasil, responsáveis pela obra civil e a Voith Siemens Hydro pelos equipamentos eletromecânicos (CBDB [1]).

A Figura 1 apresenta uma fotografia aérea com uma visão da Usina de Irapé.



Figura 1 - Vista geral do aproveitamento da UHE Irapé.

A barragem, com espaldares de enrocamento e núcleo central em solo, é a barragem mais alta já construída no Brasil, com altura máxima de 210 m e comprimento de crista de 590 m. Possui inclinação de 1V:1,3H entre bermas no talude jusante (inclinação média de 1V:1,6H) e uma inclinação máxima de 1V:1,3H no talude de montante, com média de 1V:1,5H.

As estruturas extravasoras estão situadas na ombreira esquerda, consistindo em 2 vertedouros em túnel-calha com comportas de superfície e um descarregador de fundo (Extravasor) provido com comportas segmento de fundo. As estruturas de controle situam-se junto ao reservatório sendo a condução das vazões vertidas realizada por três calhas em túneis independentes. Ao final das calhas, defletores direcionam o fluxo para uma fossa pré-escavada na calha do rio Jequitinhonha.

O reservatório apresenta N.A. máximo normal na El. 510,0 m, o que corresponde a uma área inundada de 137,16 km² e um volume total acumulado da ordem de 6 km³. O nível mínimo de operação situa-se na elevação 470,80 m sendo que o volume útil para regularização de vazões é da ordem de 3,7 km³. A Figura 2 apresenta o arranjo geral do empreendimento.

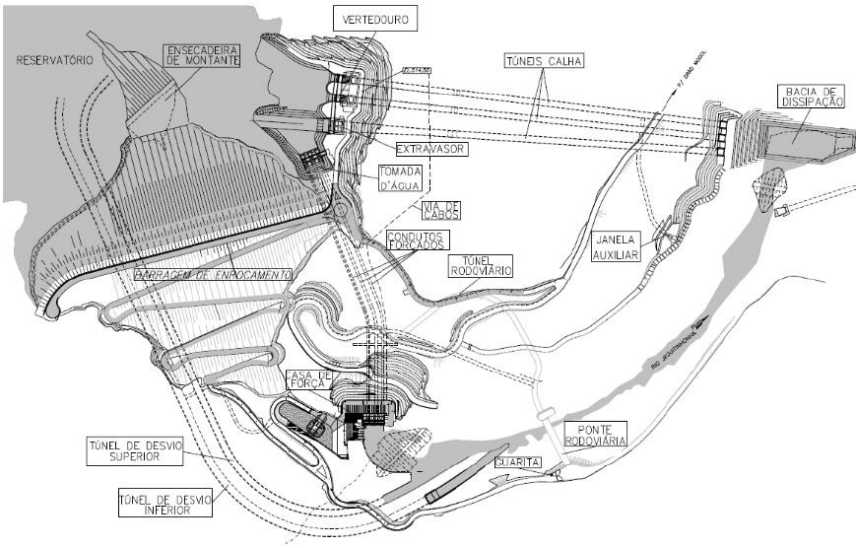


Figura 2 - Arranjo geral do aproveitamento da UHE Irapé (Planta).

Seu projeto e construção representaram um desafio de engenharia em decorrência da sua altura elevada, formato variável e encaixado do vale do rio Jequitinhonha e a presença de minerais de sulfetos existentes no maciço rochoso local. Tais condicionantes levaram à adoção de soluções de engenharia que visaram mitigar os riscos associados ao comportamento dessa estrutura, sendo tanto os relacionados a questões de projeto, de construção, assim como aos decorrentes de monitoramento para controle de desempenho da barragem.

2 CONDICIONANTES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

A UHE Irapé está inserida no domínio de xistos grafitosos atribuídos à Formação Chapada Acauã, caracterizados localmente pela presença marcante de sulfetos de ferro, potencialmente geradores de efluentes ácidos a partir de reações de oxidação.

A oxidação de sulfetos é uma reação complexa, dependente de múltiplas variáveis. CZEREWKO *et al.* [2] descreve, de forma simplificada, o processo de oxidação da pirita, sob condições atmosféricas, em presença de oxigênio e umidade:

$$2FeS_{2(s)} + 7O_2 + x.H_2O \rightarrow 2FeSO_4.n.H_2O(s) + H_2SO_4 \quad (1)$$

$$(x \geq 2; quando\ x = 2, n = 0)$$

Tem consequências como o ataque ao concreto e estruturas metálicas pela formação de águas ácidas, deterioração do enrocamento no decorrer do tempo, favorecimento à proliferação de bactérias quimiossintetizantes e precipitação de sais.

Por este motivo, durante a fase de projeto, além das investigações geológico-geotécnicas convencionais, foram realizados ensaios de caráter mineralógico e geoquímico, visando caracterizar e quantificar o teor dos sulfetos e identificar os mecanismos envolvidos no seu processo de oxidação, avaliando sua influência sobre as estruturas a serem construídas e áreas de entorno. Estes estudos são abordados por LIMA [3] e MARQUES FILHO *et al.* [4].

Os resultados destes trabalhos de investigação conduziram a modificações e adequações nos projetos civis, inclusive no arranjo geral, contemplando algumas soluções inovadoras.

A proposta original de implantação de uma estrutura em CCR foi eliminada, dadas as incertezas quanto à utilização dos materiais provenientes das escavações obrigatórias como agregado. Também a alternativa de construção de uma barragem de enrocamento com face de concreto foi descartada, dada a possibilidade de ocorrência da deterioração da laje de vedação, plinto e demais estruturas de concreto frente à agressividade do meio, além de comportamento de arqueamentos das tensões devido ao formato do vale.

Assim, a possibilidade de ocorrência desta reação foi uma das principais condicionantes do projeto, visto que a formação de sulfatos e ácido sulfúrico é exotérmica e expansiva, havendo tanto a necessidade de avaliar os materiais com maior potencial de gerar a oxidação de sulfetos quanto à possibilidade de serem empregados na obra e sob quais condições.

Outros condicionantes de destaque foram a geometria do vale, estreito e íngreme até cerca de 50% da altura da barragem, com abertura significativa nos 50% mais altos da seção da barragem, o uso de junta construtiva para possibilitar a antecipação do enchimento do reservatório e a presença de descontinuidades no fechamento da ombreira direita, que levaram à necessidade de deslocamento do eixo para jusante, nessa região.

3 ASPECTOS (ESTRATÉGIAS) DE PROJETO

O projeto da barragem teve os seguintes principais desafios, estudados em profundidade e tratados tanto na fase de projeto como na de construção:

3.1 Presença de sulfetos na rocha de fundação

A presença de rochas com sulfetos na fundação implicou em cuidados específicos para evitar a deterioração de concretos em contato com a rocha, sujeitos à deterioração por ataque ácido.

Pelo mesmo motivo, no tratamento de fundação foram empregadas caldas e argamassas produzidas com cimentos resistentes a sulfatos, adição de sílica ativa e/ou cinza volante.

Além disso, houve o cuidado de não deixar nenhuma estrutura de concreto em contato direto com a rocha, para evitar o ataque ácido com a consequente desagregação do concreto.

Como exemplo, pode ser citada a pintura epoxídica na rocha do leito do rio, antes do lançamento do CCR de regularização do vale profundo, a fim de isolar o concreto da rocha, conforme descrito por MARQUES FILHO *et al.* [4].

3.2 Formato do Vale

Relativo ao comportamento da barragem, um dos maiores desafios foi adequar o projeto ao formato do vale. Dos 210 m de altura da barragem, os 90 m mais profundos estão situados em vale muito estreito e com paredes subverticais, apresentando uma sequência de juntas de alívio. Essa condicionante geológica/geométrica levou à necessidade de ajuste geométrico, com escavação do maciço rochoso nessa porção mais profunda do vale, para evitar arqueamentos de tensões excessivos e riscos de instalação de processo de fraturamento hidráulico.

Para tanto, houve a necessidade de escavar as bordas da encosta do vale com taludes médios de 0,75H:1V nessa porção mais profunda da fundação da barragem, como demonstrado na Figura 3.

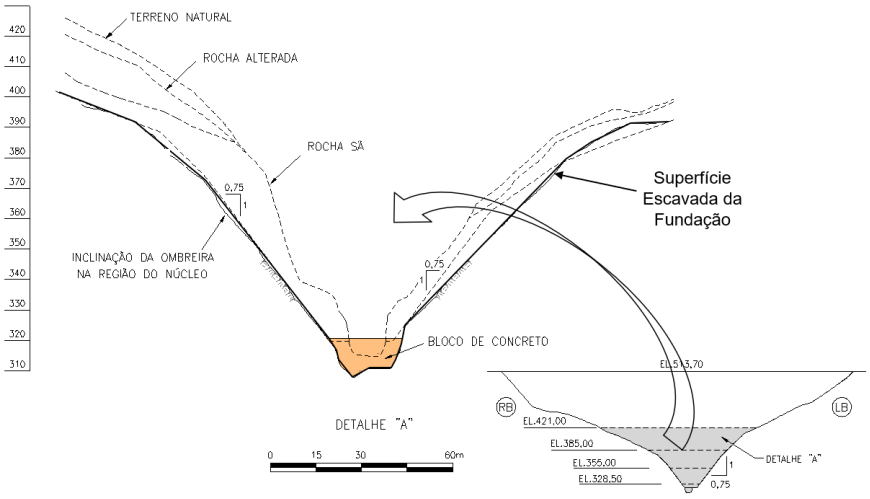


Figura 3 - Formato do Vale na direção do eixo da barragem e escavação de ajuste geométrico realizada.

Ainda, para possibilitar melhorar a transmissão das tensões para as porções inferiores do aterro da barragem, reduzindo o risco de arqueamentos de tensões e fraturamento hidráulico, na superfície de contato entre o aterro e a superfície de fundação foi colocado material mais plástico, solo argiloso com umidade de 1% a 3% da ótima de compactação, de forma a criar um efeito de lubrificação desse contato, e de encunhamento, para garantir a transmissão de tensões para a região mais estreita do fundo do vale, visando sempre garantir tensões efetivas positivas nessa porção (Figura 4).

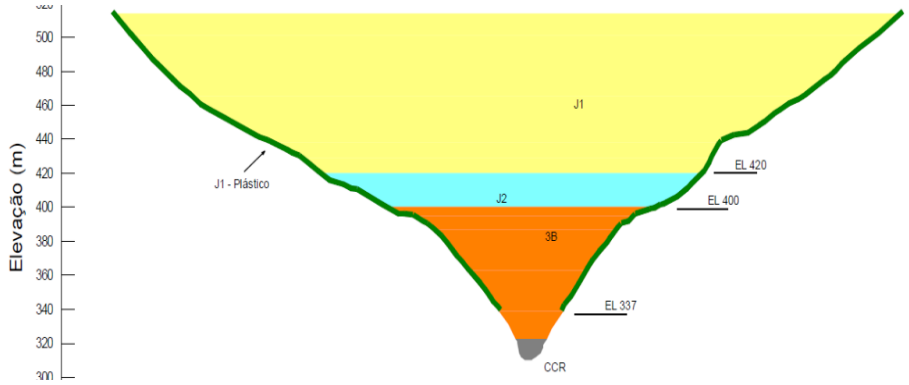


Figura 4 – Seção longitudinal. Detalhe para o material plástico colocado no contato do aterro e a superfície da fundação e para os diferentes tipos de materiais lançados.

3.3 Núcleo assente em vale estreito e profundo

Durante a limpeza de fundação, foi detectado que o vale se estreitava, chegando até a uma largura mínima de 8,0 m na superfície mais profunda de fundação da barragem. Para evitar a ocorrência de arqueamentos e alívios de tensão excessivos que pudessem resultar em tensões efetivas nulas, após estudos de tensão e deformação realizados, definiu-se que a largura mínima deveria ser de 15,0 m para um adequado comportamento do aterro da barragem. Para tanto, em cerca de 60% da base do núcleo, no trecho de jusante, houve a necessidade do alargamento da fundação por meio da construção de uma base em concreto, empregando-se a técnica de concreto compactado com rolo - CCR (Figura 5).

Outra medida adicional de segurança adotada, foi a inclusão de uma camada de material cicatrizante (fino e não coesivo – pó de pedra da britagem) a montante do núcleo, para permitir a autocicatrização caso houvesse a formação de eventuais trincas, além da inclusão de filtro e transições mais robustos a jusante do núcleo (largura do filtro nas porções inferiores do núcleo de 2,5 m) (Figura 6).



Figura 5 - Vista do fundo do vale – incluindo a retificação da fundação com preenchimento de CCR.

3.4 Presença de sulfetos nas rochas a serem empregadas como enrocamento

Uma vez decidido pela seção da barragem com um zoneamento de espaldares em enrocamento com núcleo central de solo, os materiais granulares da barragem foram utilizados a partir do seu comportamento geoquímico e geomecânico, classificados em função de sua origem, grau de alteração, frente às condições a que ficariam submetidos, visando garantir a estabilidade do maciço, bem como preservar os materiais da desintegração por eventuais ataques ácidos.

Considerando que a oxidação de sulfetos é uma reação exotérmica e expansiva, que resulta na formação de sulfatos e na geração de ácido sulfúrico (pH de até 2,5), optou-se pela utilização de materiais com menor potencial de ocorrência dessa reação nas bordas dos espaldares, tanto a montante quanto a jusante (enrocamentos com baixo teor de sulfetos). Os materiais com maior teor de sulfetos foram dispostos próximos ao núcleo, onde há menor exposição à água e ao oxigênio – condições necessárias para a ocorrência do processo de oxidação.

As rochas classificadas como 5A, 5 e 6 apresentam potencial para geração de soluções ácidas, mesmo com baixos teores de S_{total} (sulfetos totais). As rochas mais decompostas (5 e 5A) contêm quantidades significativas de produtos de oxidação que representam uma acidez armazenada que pode ser liberada em contato com a água. Já os fragmentos de rocha sã (6) mostram que, devido à menor exposição dos sulfetos, a formação de efluentes ácidos se restringe à fração fina deste material.

Desta forma, a montante do núcleo de vedação foram utilizados enrocamentos do tipo 5L, “lixiviado”, cujo critério de aceitação adotado foi ter teor de S_{total} menor que 0,1% e o pH da pasta maior que 5. Acima da elevação 470 m, correspondente ao trecho de oscilação do reservatório, foram utilizados enrocamentos do tipo 7, “isento de sulfetos”.

Enrocamentos tipo 6B, “isentos de sulfetos”, foram utilizados no preenchimento do leito do rio, a jusante do núcleo, numa faixa junto aos paredões do vale e na plataforma

entre a barragem e a casa de força, regiões estas sujeitas a elevações do N.A. de jusante, tanto pelas águas de percolação quanto pela restituição das vazões ao vale de jusante (N.A. máx max jus = 340,60 m).

Na face do talude de jusante foi empregado o enrocamento tipo 9, também “isento de sulfetos”, considerando sua exposição à umidade e oxigênio.

Para os filtros e transições foram utilizados, respectivamente, areia natural transportada e materiais artificialmente processados a partir da pedreira nas proximidades do local da obra, denominada Olhos D’água, distante 8,0 km das instalações de processamento das transições.

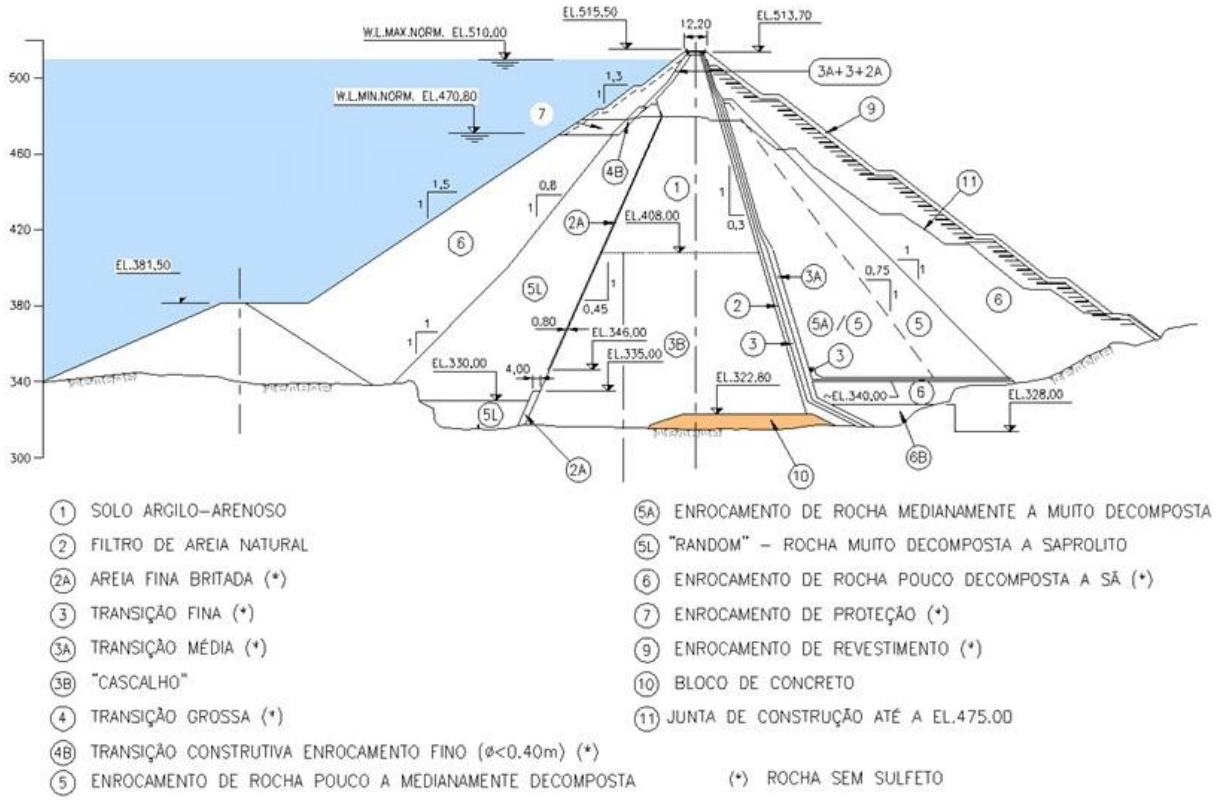


Figura 6 - Seção transversal com a distribuição dos materiais de construção.

3.5 Deformabilidade do núcleo

Como o vale possui largura muito reduzida no trecho mais profundo da fundação da barragem, durante a fase de projeto foi verificada tendência à ocorrência de arqueamento e alívios de tensões nessa região, em função de sua geometria. Caso, nessa porção inferior fosse utilizado um material muito deformável, se acentuaria o risco de maiores arqueamentos e de fraturamento hidráulico. Para reduzir a taxa de deformação nesta região, foi utilizado um material com maior módulo de deformabilidade na parte inferior do núcleo (cascalho argiloso - 3B), como indicado na Figura 6. Esse material foi obtido a partir de uma mistura em usina, composta por parte de solo mais argiloso mesclado com cascalho (CALCINA *et al.* [5]).

Com o mesmo objetivo, o solo areno-argiloso (J2) também apresenta maior módulo de deformabilidade em relação ao solo argilo-arenoso (J1), localizado em trecho mais elevado (Figura 4), ou seja, priorizou-se o uso de materiais menos deformáveis na

porção inferior do corpo da barragem, gradando para materiais mais deformáveis nas porções superiores, onde o vale abre e apresenta geometria convencional.

3.6 Proteção dos enrocamentos do espaldar de jusante (“guarda-chuva”)

A fim de reduzir os efeitos da infiltração de água pluvial no espaldar de jusante, foram instaladas mantas de polietileno de Alta Densidade (PEAD) na extremidade de jusante, inclinadas para jusante, atuando como uma espécie de “guarda-chuva” (Figura 7).

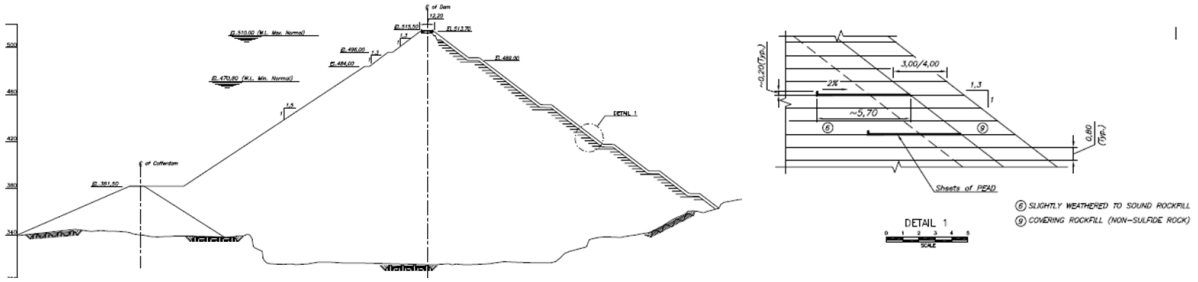


Figura 7 - Detalhe da instalação de mantas PEAD no paramento de jusante.

4 PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

O plano de instrumentação foi concebido com foco na minimização dos riscos associados aos possíveis modos de falha da barragem, a saber:

- Deformações excessivas do maciço que pudessem resultar em surgimento de trincas ou perda da borda livre;
- Instabilização;
- Erosão interna por fluxo concentrado – ruptura hidráulica, devido a:
    - Caminhos preferenciais de percolação pelo núcleo causado por arqueamentos de tensões;
    - Fissuras no contato do núcleo com a ombreira, causadas pela deformação do núcleo argiloso;
    - Baixas tensões efetivas no fundo do vale, causadas por arqueamento de tensões no núcleo argiloso.

O resultado foram 5 seções instrumentadas, conforme apresentado na Figura 8 e quantitativos da Tabela 1. A seção 3, localizada na porção central, no leito do rio, representa a seção de máxima altura da barragem.

Tabela 1 - Instrumentos instalados na UHE Irapé.

Instrumento	Qtde.	Instrumento	Qtde.
Piezômetros de corda vibrante	50	Medidor de recalque magnético	17
Piezômetros de tubo	4	Marco superficial	54
Células de tensão total	33	Inclinômetro	2
Caixa sueca	33	Medidor de vazão	5
Medidores de recalque elétrico	38	Medidor de pH	22

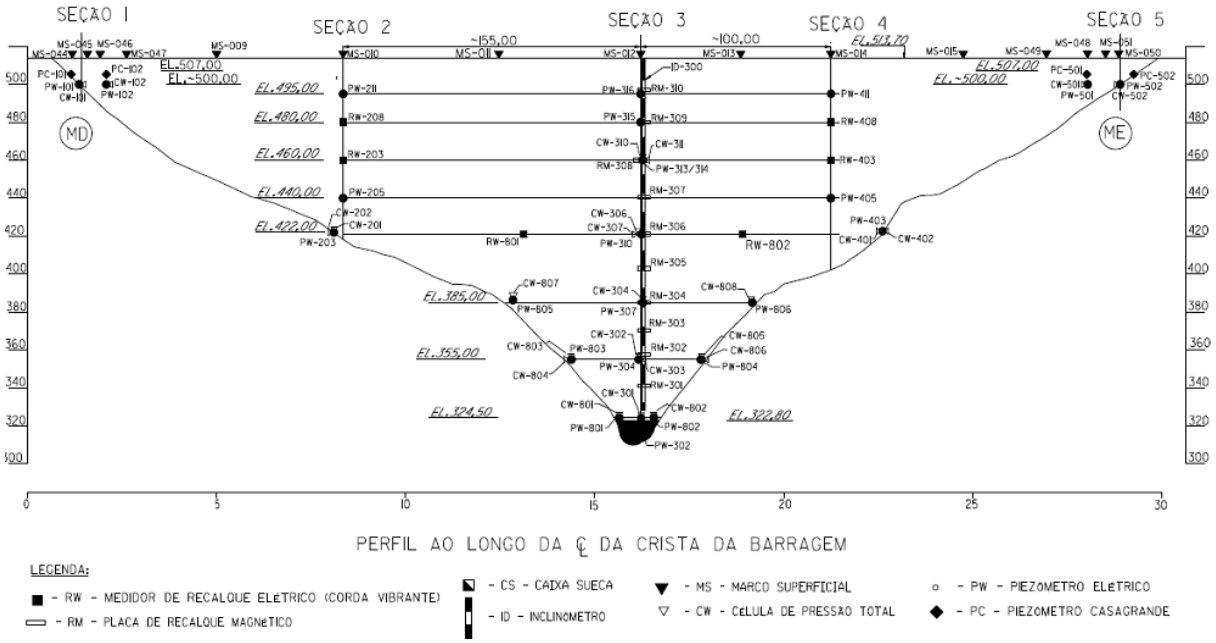


Figura 8 - Seção longitudinal, passando pelo eixo, com a indicação das 5 seções transversais instrumentadas.

4.1 Monitoramento dos modos falha “Instabilização” e “Perda de Borda Livre”

Para garantir o monitoramento do modo de falha por eventuais recalques excessivos do aterro, o plano de instrumentação previu o monitoramento das deformações totais por meio de marcos superficiais, com o apoio de medidores de recalque de corda vibrante, medidores de recalque magnéticos, caixas suecas e inclinômetros.

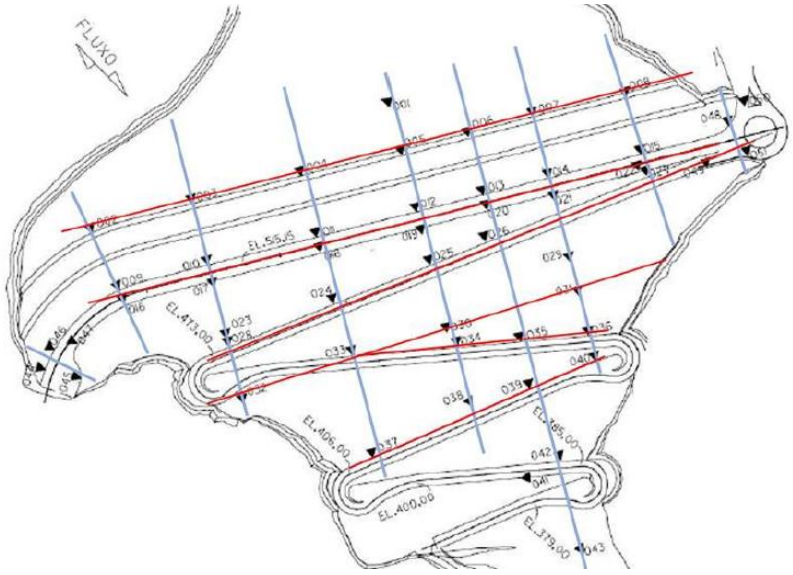


Figura 9 - Distribuição espacial dos Marcos de Superfície instalados no aterro.

Os marcos superficiais (MSs) foram distribuídos visando contemplar toda a área do aterro, mantendo-se alinhamentos longitudinais e transversais, o que também favorece a avaliação de recalques diferenciais. Ressalta-se que alguns dos MSs foram instalados nas cabines de leitura da instrumentação, permitindo a correção das deformações medidas pelos medidores de recalque de corda vibrante e das caixas suecas, uma vez que esses instrumentos registram deslocamentos em relação à cota

de referência da própria cabine, permitindo, assim, a correção dos dados de deformações gerados.

Tendo em vista a presença de sulfatos no maciço rochoso, o monitoramento da integridade dos enrocamentos é realizado de forma indireta, por meio do monitoramento do pH da água no enrocamento de montante, núcleo de vedação e enrocamento de jusante. Foram instalados mecanismos para coleta de água por bombeamento em diferentes profundidades, durante a fase inicial de operação. Os tubos dos inclinômetros também são utilizados para coleta de água e medição do pH em diferentes profundidades.

Ressalta-se que os instrumentos elétricos fornecem dados de temperatura, que também podem ser utilizados para avaliação da ocorrência de reações químicas no aterro, tendo em vista que essas reações são exotérmicas.

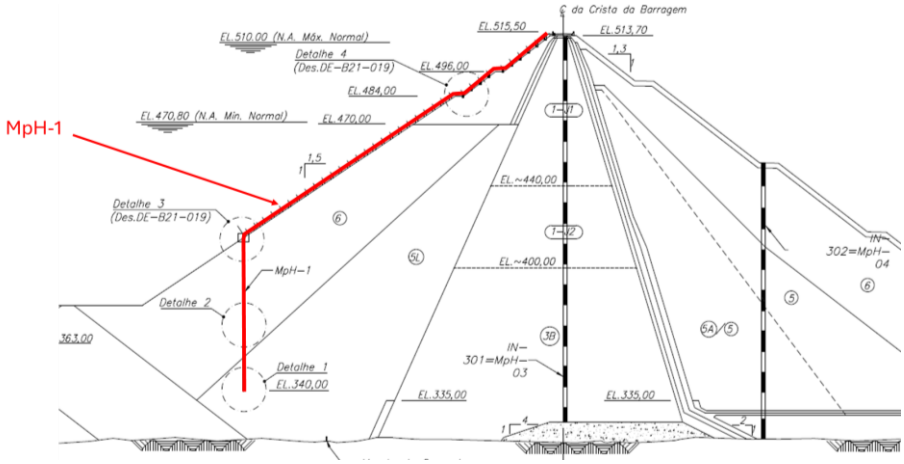


Figura 10 - Sistema instalado para monitoramento do pH.

Para o monitoramento quanto ao modo de falha de instabilização, além dos dados associados às deformações, são monitoradas as poropressões, por meio de piezômetros elétricos de corda vibrante, bem como as tensões efetivas por meio de células de pressão total acopladas a piezômetros. Inclinômetros também foram instalados com essa finalidade, podendo indicar deslocamentos localizados que configurem a formação de eventuais superfícies preferenciais de escorregamento.

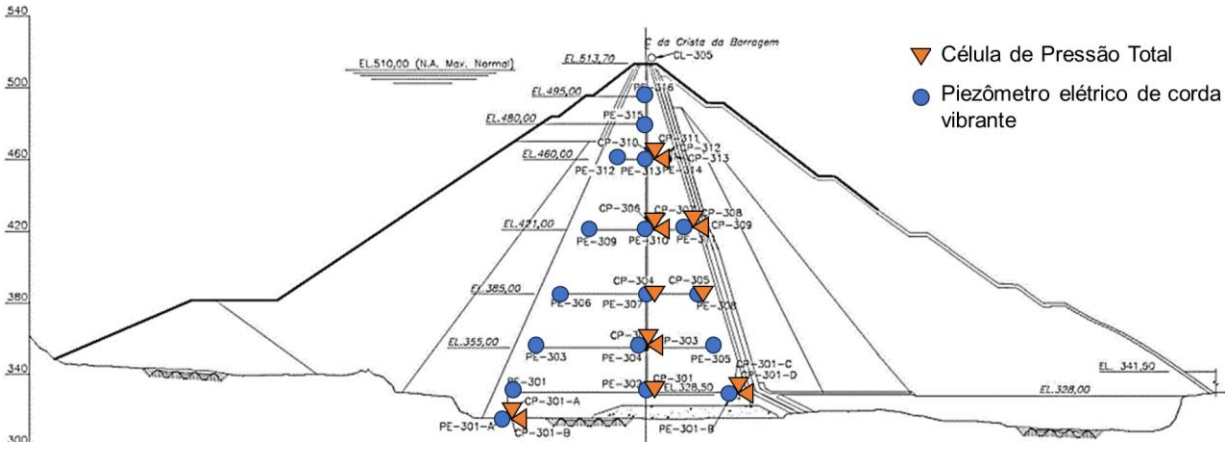


Figura 11 – Instrumentos para monitoramento de poropressões e tensões totais no núcleo.

4.2 Monitoramento do modo falha “Erosão Interna”

Devido à geometria do vale com a porção inferior muito fechada, o maior destaque foi dado ao monitoramento do modo de falha “Erosão Interna” (fraturamento hidráulico), tendo em vista a ocorrência de arqueamentos e alívios de tensões principalmente no trecho mais fundo do vale.

4.2.1 Erosão interna por fluxo concentrado em caminhos preferenciais de percolação pelo núcleo (fraturamento hidráulico)

4.2.1.1 Monitoramento de deformações diferenciais

A geometria da barragem demanda o monitoramento de deformações diferenciais transversais e longitudinais que, caso ocorressem, poderiam gerar trincas no aterro, associadas ao modo de falha de erosão interna. Destaca-se que os instrumentos estão posicionados de forma simétrica, com este intuito, permitindo ainda a análise comparativa entre os instrumentos instalados nas seções 2 e 4.

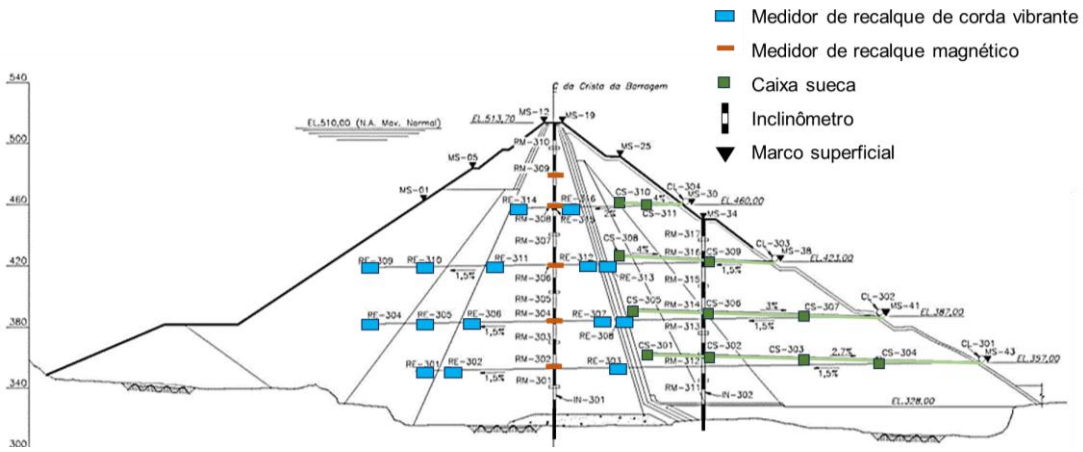


Figura 12 - Monitoramento de deformações (seção 3 – máxima altura).

Nota-se que os medidores de recalque de corda vibrante e as caixas suecas foram instalados aproximadamente na mesma elevação, permitindo o monitoramento de deformações diferenciais em diferentes zonas de materiais da seção transversal, expostos a diferentes tensões confinantes. Estes instrumentos estão dispostos nas seções transversais 2, 3 e 4, onde o aterro é mais elevado, como apresentado na Figura 8.

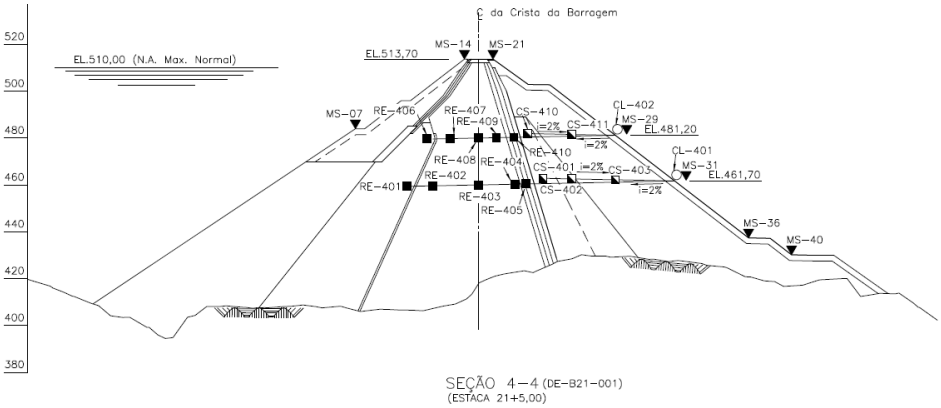


Figura 13 - Monitoramento de deformações (seção 4).

Em relação às interfaces entre os diferentes materiais e a eventuais deformações diferenciais, a disposição dos instrumentos favorece a avaliação das deformações nos diferentes materiais dispostos no núcleo de vedação, havendo instrumentos instalados nas elevações 387 m e 423 m, aproximadamente na transição entre os materiais 3B/J2 (solo com cascalho/solo siltoso) e J2/J1 (solo siltoso/solo argiloso).

Os medidores de recalque de corda vibrante foram instalados no núcleo e espaldar de montante, uma vez que possuem cabos mais finos que as caixas suecas, o que permite a travessia do núcleo no sentido montante-jusante com mais segurança. Este cuidado foi tomado visando evitar a formação de caminhos preferenciais de percolação através do núcleo nas regiões de passagem de cabos, também um ponto frágil associado ao risco de erosão interna.

As caixas suecas, com mangueiras de maior diâmetro, foram posicionadas a jusante do núcleo e transições.

Na seção 3, de maior altura, foram instalados dois conjuntos de inclinômetros associados a medidores de recalques magnéticos, sendo um no núcleo (no eixo da barragem) e outro no espaldar de enrocamento de jusante. Enquanto os inclinômetros possibilitam o acompanhamento dos deslocamentos horizontais, principalmente no sentido montante/jusante, em função do empuxo do reservatório e das deformações inerentes do aterro, as placas de recalque magnético permitem a avaliação de recalques diferenciais em regiões com mesmo afastamento do eixo.

Utilizar metodologias diferentes de leitura também é uma estratégia que favorece a continuidade do monitoramento durante a vida útil da estrutura, como no caso das placas de recalque magnético e dos medidores de recalque elétrico.

4.2.1.2 Monitoramento dos gradientes hidráulicos e poropressões

No núcleo, os trios de piezômetros alinhados em várias elevações possibilitam o acompanhamento dos gradientes de percolação. Os instrumentos instalados a jusante auxiliam ainda na verificação do comportamento do filtro vertical, enquanto os instrumentos da fundação e CCR na avaliação da poropressão na região do contato com o aterro.

Estes piezômetros, associados às células de tensão total adjacentes, permitem monitorar as tensões efetivas, cujo decréscimo pode sugerir o aparecimento de caminhos preferenciais de percolação e a ocorrência de fraturamento hidráulico.

$$\sigma_{efetiva} = \sigma_{total} - u \qquad (2)$$

Onde: σ_{total} = tensão medida pela célula de tensão total;

u = poropressão medida pelo piezômetro associado.

As células de pressão total foram posicionadas na vertical e na horizontal, para permitir uma avaliação mais ampla da distribuição de tensões no aterro, prevendo a medição das tensões principais maior e menor.

Nas seções 2 e 4 foram instalados piezômetros na rocha de fundação, a montante e a jusante da cortina de injeção, para avaliar a eficiência do tratamento, tendo em vista a existência de juntas de alívio na fundação da barragem.

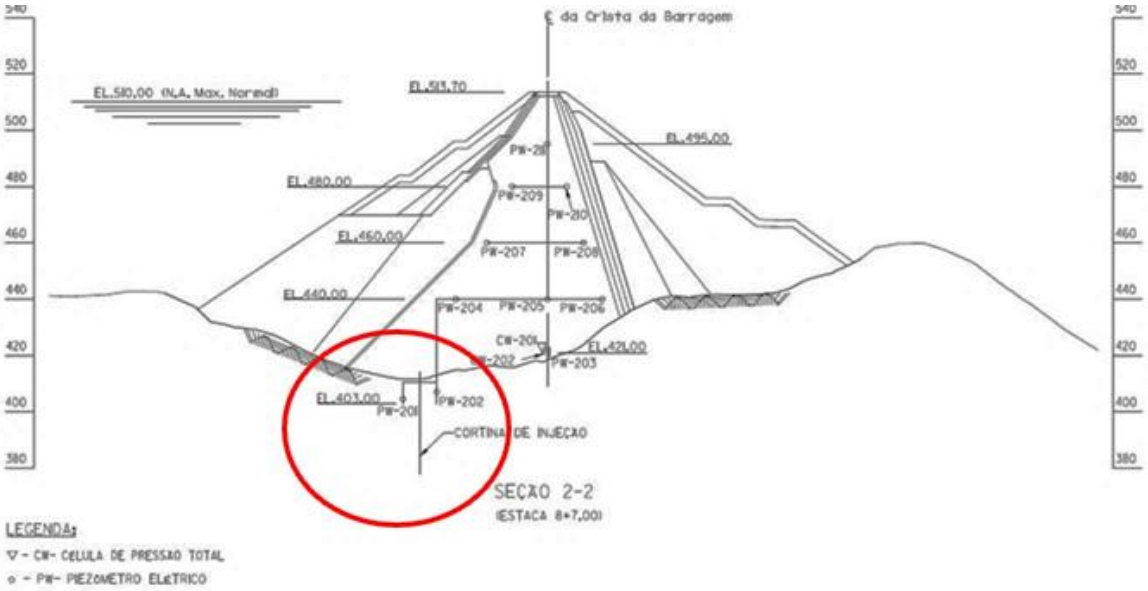


Figura 14 - Piezômetros e Células de Carga instalados na Seção 2. O detalhe mostra os piezômetros que auscultam o comportamento da cortina de injeção.

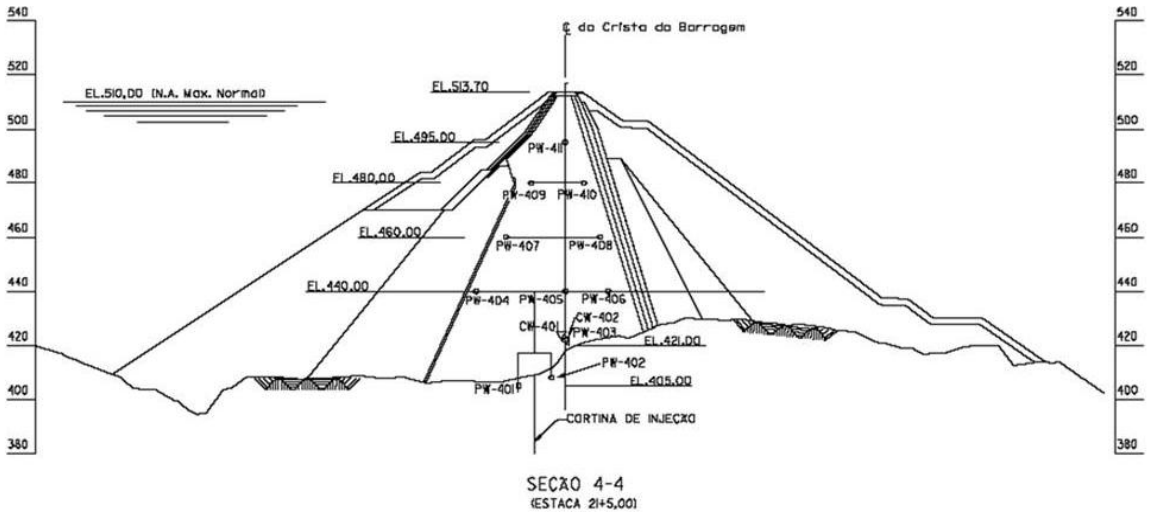


Figura 15 - Piezômetros e Células de Carga instalados na Seção 4.

4.2.2 Erosão interna por fluxo concentrado no contato do núcleo com as ombreiras

A deformação do núcleo por adensamento, aliado a processos de arqueamento e alívios de tensão, poderia levar ao aparecimento de fissuras no contato com a ombreira, que poderia criar um caminho preferencial de percolação e eventual erosão interna por fluxo concentrado na região. Como descrito anteriormente, para minimizar esse efeito, junto à fundação foi colocada uma camada de material mais plástico, de forma a permitir deformações e ser um material com capacidade autocicatrizante.

Assim, este modo de falha também é monitorado por meio de piezômetros associados a células de tensão total, para permitir o acompanhamento das tensões efetivas na interface núcleo-ombreira. Neste caso, o monitoramento foi reforçado na região no topo da barragem junto às ombreiras, onde a tensão total é menor (altura menor do maciço), e a influência do deplecionamento do reservatório é mais severa, podendo resultar em alívio das tensões confinantes, como mostrado na Figura 16.

Uma vez que as deformações nesta região tendem a ocorrer prioritariamente na direção do fundo do vale, as células de tensão total estão posicionadas na vertical, sempre associadas a um piezômetro, monitorando, portanto, tensões totais e efetivas horizontais. É monitorado tanto o contato com a fundação quanto o próprio aterro.

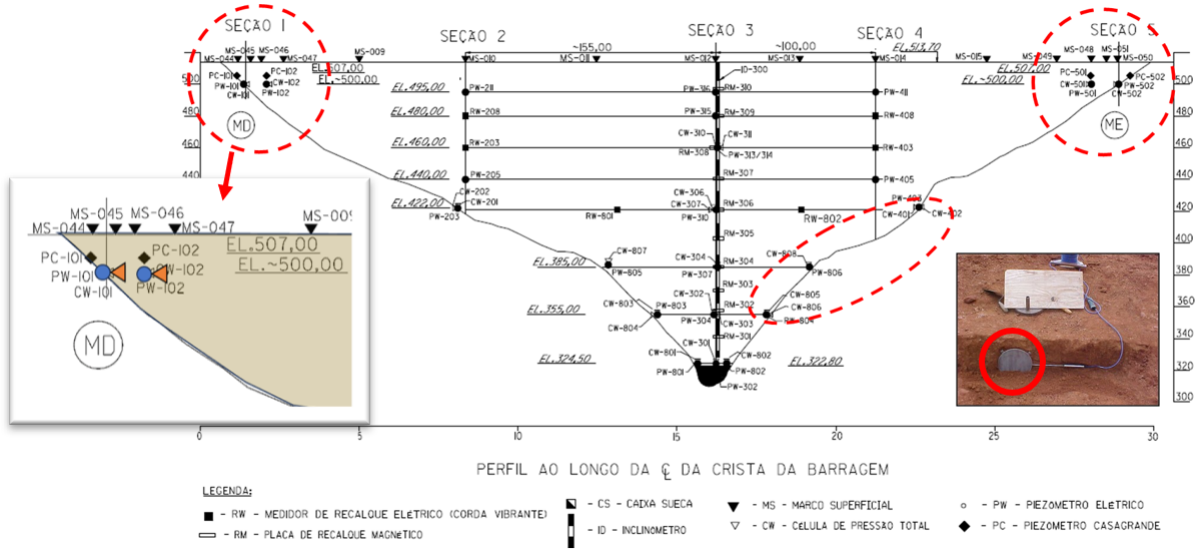


Figura 16 - Monitoramento das tensões efetivas na interface núcleo-ombreiras, com detalhe da ombreira direita e de célula de carga monitorando tensões horizontais.

A instalação de piezômetros Casagrande nas ombreiras, em regiões que frequentemente não estão saturadas em função das oscilações do reservatório, favorecem a redundância do monitoramento frente à potencial descalibração dos sensores de corda vibrante.

4.2.3 Erosão interna por fluxo concentrado devido a redução das tensões efetivas no fundo do vale

No trecho mais profundo do aterro, foi disposta uma parcela significativa das células de carga, a fim de monitorar potencial processo de erosão interna associada ao alívio de tensões decorrentes do formato do vale (arqueamento de tensões). Esse efeito é mais marcante na barragem de Irapé tendo em vista que trechos da fundação apresentam larguras bastante reduzidas, da ordem de 15 m, ante uma altura de 210 m da barragem, o que poderia agravar a ocorrência de arqueamentos e alívios de tensões.

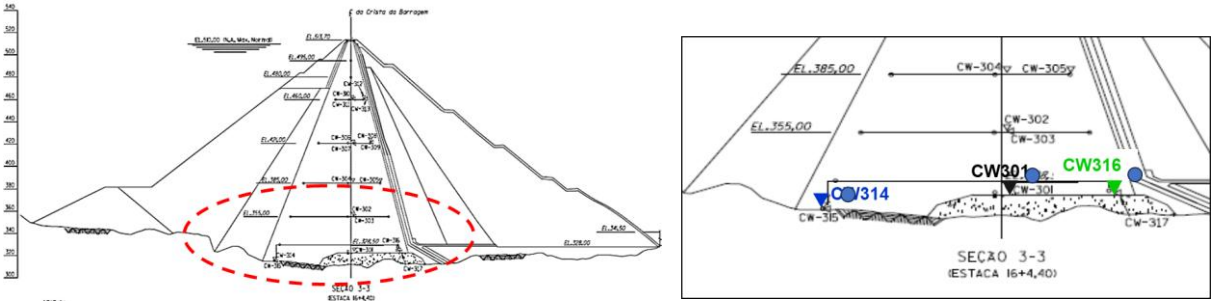


Figura 17 - Monitoramento das tensões efetivas na interface núcleo-fundação.

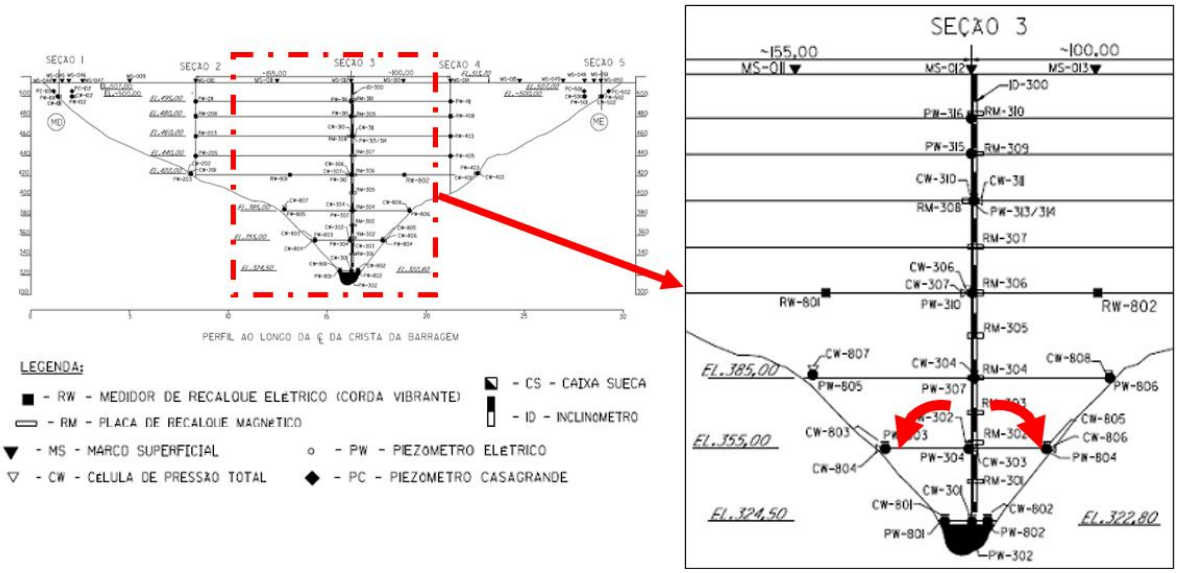


Figura 18 - Monitoramento das tensões efetivas e indicação do arqueamento de tensões no fundo do vale.

Para complementar o monitoramento de percolações, foram instalados 5 medidores de vazão no aterro, sendo 4 deles em cotas mais elevadas, e 1 que monitora o leito do rio (MV-3). A presença de interceptos de drenagem reduz a área de influência monitorada, favorecendo a identificação de trechos com indícios de mau comportamento, caso venham a ocorrer. O MV-3 foi instalado sobre o núcleo da antiga ensecadeira de jusante, conforme Figura 19.

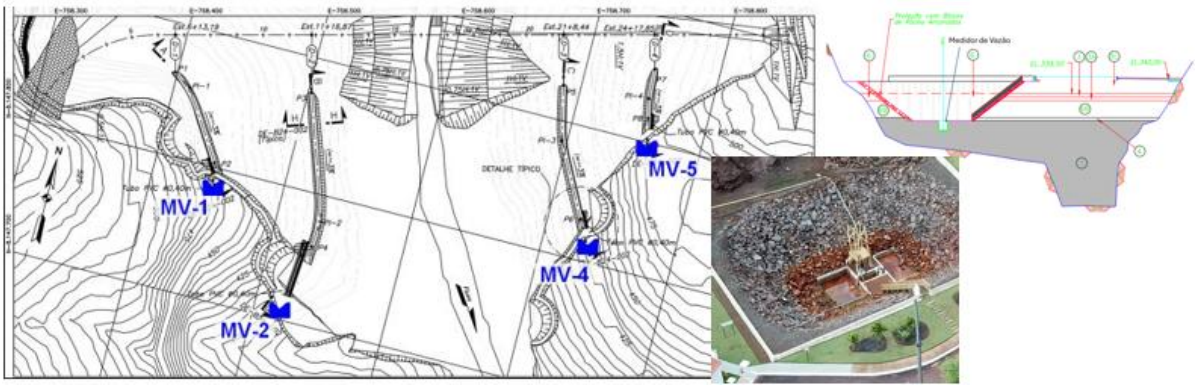


Figura 19 - Interceptos de drenagem com indicativo dos locais de instalação dos medidores de vazão e seção transversal ao MV-03, com a imagem do local ao lado.

5 COMPORTAMENTO DA BARRAGEM NA FASE DE OPERAÇÃO

Os últimos relatórios de análise da instrumentação e revisões periódicas de segurança indicam que a barragem da UHE Irapé apresenta comportamento adequado, sem alterações que possam suscitar risco à estrutura. Os valores monitorados estão aderentes aos respectivos valores de referência, bem como ao comportamento histórico, passados 20 anos de operação.



Figura 20 - Vista aérea do talude de jusante (esq.), Vista aérea do talude de montante (centro) e da crista (dir.).

Alguns instrumentos cumpriram seu papel de monitoramento da estrutura durante o período de construção e início de operação, quando ocorrem os maiores recalques e apresentavam tendência de estabilização de leituras à medida que foram sendo desativados, como alguns medidores de recalque e de pH.

Tendo em vista a tendência de estabilização das deformações, atualmente lentas e condicionadas a efeitos de c*reep*, a dificuldade técnica de implantação de novos instrumentos em uma barragem com 210 m de altura, além do risco que novas perfurações no núcleo da barragem trariam, considera-se que a presente quantidade de instrumentos da UHE Irapé é suficiente para auscultação das grandezas e condicionantes da estrutura, permitindo um monitoramento de segurança adequado.

Leituras iniciais de pH realizadas a partir do MpH-01 e dos inclinômetros oscilavam entre 5 e 6, tendo sido estabilizadas em 6 no medidor instalado no paramento de montante a partir de setembro de 2007, indicando que as reações dos sulfatos estavam controladas e não ofereceram condições desfavoráveis ao comportamento dos enrocamentos. Em alguns locais, especialmente os mais elevados, ainda são detectados pH da ordem de 4, que vem sendo rotineiramente monitorados.

De modo geral, os medidores de vazão medem vazões abaixo do estimado em projeto, com oscilações acompanhando as variações do reservatório. O MV-3, instalado sobre a ensecadeira de jusante, apresentava vazões adequadas que foram se extinguindo ao longo do tempo, estando seco atualmente. Aparentemente, a água percolada que era represada pela ensecadeira de jusante (não incorporada à estrutura principal), encontrou outro caminho preferencial, deixando de elevar o nível até cota da caixa do medidor, impossibilitando a sua medição. Ainda que o MV-3 pudesse contribuir para o acompanhamento do desempenho da barragem, a impossibilidade prática de sua recuperação não compromete a avaliação da estrutura, uma vez que o monitoramento pelos demais instrumentos se mostra suficiente, conforme última Revisão Periódica de Segurança da barragem, elaborada pela projetista da barragem.

Os piezômetros indicam perda de carga entre instrumentos alinhados aproximadamente numa mesma horizontal, indicando comportamento adequado de vedação do núcleo, sem indicativos de ocorrência de ruptura hidráulica. Os gradientes hidráulicos dos piezômetros instalados a montante do filtro são relativamente elevados, contudo, o sistema de filtro e transições de jusante foram superdimensionados, sendo efetivos para reterem eventuais materiais finos que porventura fossem carreados do núcleo, causando uma colmatação de jusante para

montante, o que cessaria a continuação de um processo de erosão interna que tentasse se desenvolver. Não há histórico de carreamento de materiais no período.

A despeito da preocupação do projeto com possíveis efeitos de arqueamentos/alívios de tensão, o monitoramento indica que o comportamento na região do fundo do vale é adequado, com tensões efetivas positivas, o que também ocorre nas ombreiras. A instrumentação confirma um pequeno alívio de tensão no contato do núcleo com a fundação, mostrando ter sido importante o emprego de materiais menos plásticos no núcleo (Figura 21 e Figura 22).

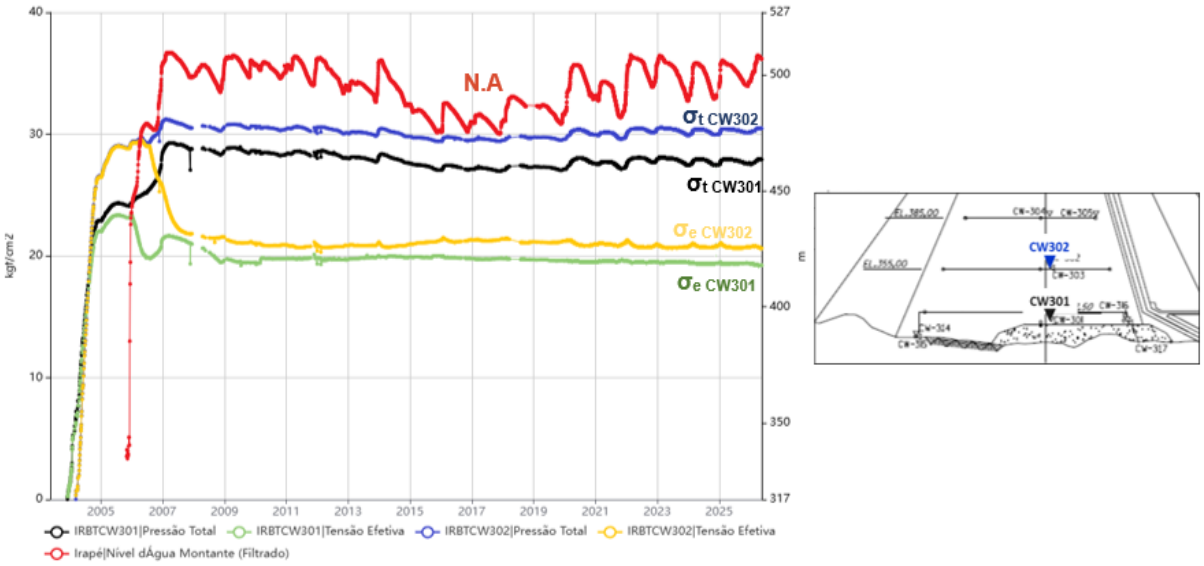


Figura 21 – Tensões totais e efetivas medidas no núcleo, mostrando leituras, no contato do núcleo com a fundação, inferiores àquelas na linha instrumentada imediatamente acima.

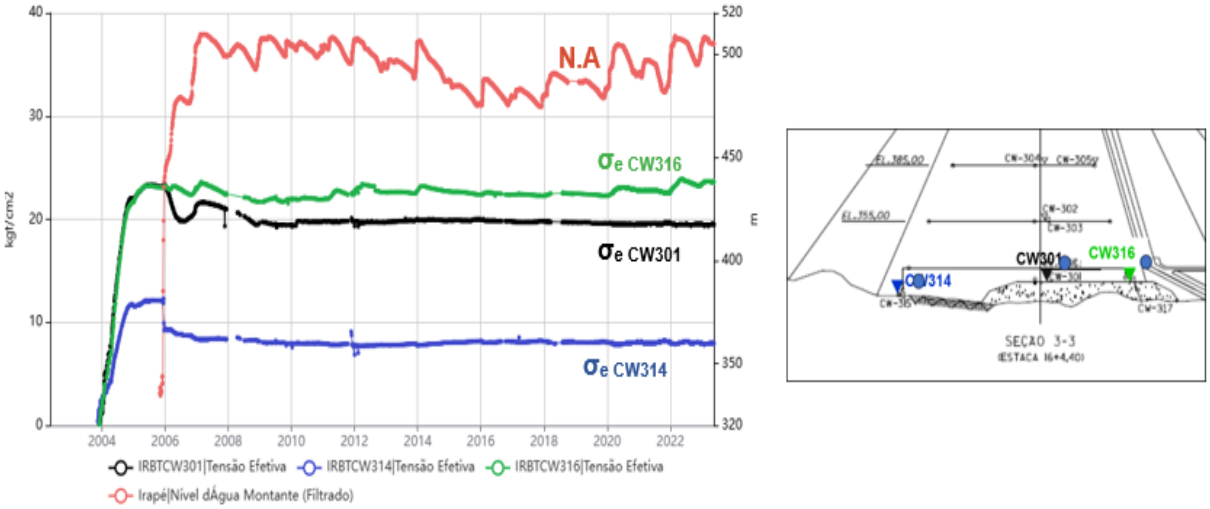


Figura 22 – Tensões efetivas no contato do núcleo com a fundação.

O histórico mostra uma queda de tensões efetivas no trecho mais elevado da ombreira esquerda, em período de rebaixamento do reservatório, com posterior recuperação, indicando que o uso de material mais plástico no contato foi acertado, favorecendo a acomodação do aterro e o seu confinamento, mantendo as tensões efetivas positivas.

6 CONCLUSÕES

A UHE Irapé constituiu uma grande obra de engenharia, exigindo a realização de amplos estudos na fase de projeto, com o objetivo de assegurar condições adequadas de segurança da estrutura ao longo de sua vida útil.

Nota-se que o projeto da barragem previu sistemas robustos de proteção, com vista a minimizar os riscos associados aos principais modos de falhas, particularmente em relação à erosão interna. Os detalhes de projeto, associados a um plano de instrumentação rigoroso, têm garantido o comportamento seguro das estruturas.

O plano de instrumentação da barragem foi concebido com o intuito de monitorar o comportamento da estrutura face aos principais riscos mapeados na fase de projeto. Observa-se que a escolha dos instrumentos foi realizada de forma criteriosa, visando auscultar as grandezas de interesse em conformidade com o arranjo da estrutura, suas particularidades geotécnicas e comportamento esperado.

A instrumentação tem se mostrado efetiva em sua proposta desde a fase de construção, permitindo acompanhar o comportamento da barragem face às intenções do projeto. Ainda que alguns instrumentos, estejam inoperantes, já cumpriram o seu papel de monitorar a fase de construção e pós-construtiva, quando aconteceram as maiores deformações. Atualmente tais grandezas são reduzidas apresentando um estado de deformações lentas.

A disposição dos instrumentos favorece uma análise ampla e integrada, permitindo a correlação entre os aspectos relacionados à percolação, tensão, deformação e vazão, possibilitando um diagnóstico preciso do comportamento, com um monitoramento adequado de segurança da estrutura.

Apesar de todos os desafios enfrentados em uma barragem dessa dimensão, aliado à geometria desfavorável do vale e à presença de sulfatos no maciço rochoso, verifica-se que a estrutura apresenta desempenho adequado passados 20 anos do início de operação.

7 PALAVRAS-CHAVE

Instrumentação, Modos de falha, Barragem de Enrocamento com Núcleo, Sulfatos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CBDB (2009) - *Main Brazilian Dams III: design, construction and performance*, Comitê Brasileiro de Barragens, 194-202, Rio de Janeiro.

[2] CZEREWKO, M.A.; CRIPPS, J.C.; REID, J.M.; DUFFELL, C.G. (2003) – *The effects of storage conditions on the sulphur speciation in geological material, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36: 331-342, Londres.

[3] LIMA, A. L. C. (2009) – Influência da presença de sulfetos na implantação da UHE Irapé – Vale do Jequitinhonha – Minas Gerais, Dissertação (Mestrado) – UFOP, Escola de Minas, NUGEO, Ouro Preto.

[4] MARQUES FILHO, P.; WUNDER, E.; CALCINA, A. M.; DUARTE, J.; LIMA, A. L. C. (2009) – *Irapé Power Plant - Design and Construction Measures Required By Sulfide Rich Rock Mass,* ICOLD – 23º Congresso de Grandes Barragens, Brasília.

[5] CALCINA, A. M.; MARQUES FILHO, P. L.; WUNDER, E.; MACHADO, R. A. (2008) – Barragem de Irapé - Principais Aspectos de Projeto, Construção e Comportamento, Geosul, Florianópolis.

	**Luiz Filipe Venturi VIANNA** Engenheiro Ambiental e Civil, com pós-graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho pela FUMEC e Mestre em Geotecnia pela UFMG. Atuou como Analista Ambiental da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), no Núcleo de Emergências Ambientais, no período de 2006 a 2014. Desde 2014 atua como Engenheiro de Segurança de Barragens na Cemig.
	**Teresa Cristina FUSARO** Engenheira Civil pela UFMG e Mestre em Geotecnia de Barragens pela UFOP, com mais de 40 anos de experiência na área de segurança e manutenção de barragens. Sócia-proprietária da Fusaro Engenharia e Consultoria Ltda, atualmente atua como consultora nas áreas de inspeção, instrumentação e análises de riscos de barragens.
	**Alex Martins CALCINA** Engenheiro Civil Geotécnico pelo Instituto de Ensino de Engenharia Paulista, atuando há 40 anos na área de projetos geotécnicos, tendo participado em mais de 40 projetos no Brasil e no Exterior. Há 33 anos atua na Empresa Intertechne Consultores, como consultor interno da área de Geotecnia.
	**Luiz Antônio MAIA Júnior** Engenheiro Civil pela Escola de Minas da UFOP, Especialista em Estruturas pela UFMG e em Segurança de Barragens pelo IDD. Atuou como coordenador técnico de projetos ligados a Estruturas de Aço entre 2007 e 2014 na Usiminas Mecânica e AtkinsRéalis e, desde 2014, atua como Engenheiro de Segurança de Barragens na Cemig.

SIB
SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

INSTALAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DE MONITORAMENTO EM BARRAGENS

Eng. João Francisco Alves Silveira

SBB Engenharia Ltda

INTRODUÇÃO

Dentre os diversos tópicos de destaque, objetivando assegurar o bom desempenho da instrumentação no monitoramento de barragens de concreto ou de terra-enrocamento, a instalação dos instrumentos pode ser considerada uma das mais etapas importantes, visto que, caso não seja executada corretamente, poderá comprometer seriamente a supervisão do desempenho da barragem durante sua vida útil.

FATORES BÁSICOS NO SUCESSO DE UM PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

- Ao selecionar os instrumentos, o principal aspecto almejado é a sua confiabilidade, visto que está em jogo a supervisão das condições de segurança de uma barragem, cuja ruptura pode acarretar consequências devastadoras;
- O baixo custo de um instrumento nunca deve dominar o processo de seleção, sendo pouco provável que um equipamento de menor custo resulte em um custo total inferior;
- Pode-se observar, nos dados apresentados a seguir, que o custo da instrumentação de uma barragem representa uma parcela reduzida em relação ao custo total do empreendimento. Dessa forma, não se justifica, a princípio, uma redução significativa na quantidade de instrumentos a serem instalados

FATORES BÁSICOS NO SUCESSO DE UM PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

A seguir, apresentam-se os custos envolvidos na instrumentação das estruturas de barramento da UHE Água Vermelha, da CESP:

- ✓ Projeto e assessoria técnica 10%
- ✓ Instrumentos 10%
- ✓ Instalação 30%
- ✓ Operação e análise ..... 50%.

EXPERIÊNCIA PRÉVIA DO PROJETISTA

Nos últimos anos, têm sido constatadas falhas significativas nos planos de instrumentação de algumas barragens, principalmente nas de concreto, em decorrência da elaboração do projetos por empresas sem a necessária experiência. Bastaria, em muitos casos, consultar as soluções que vêm sendo aplicadas com sucesso em nosso País, há mais de cinco décadas, para a elaboração de projetos mais eficientes.

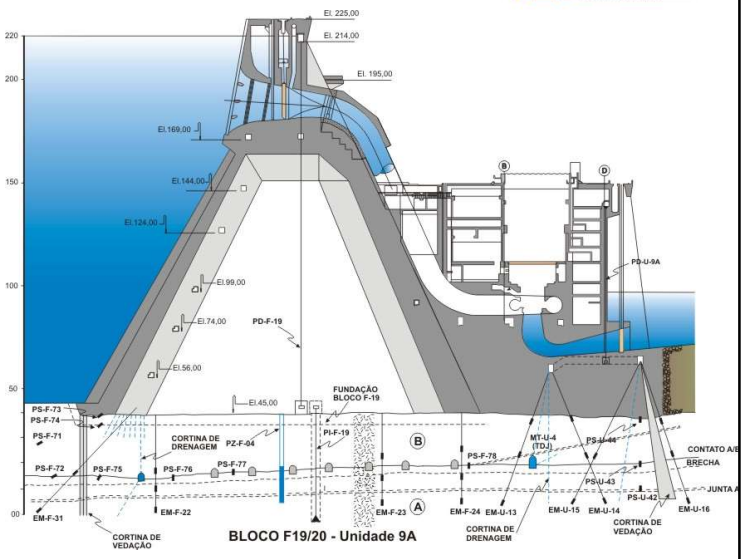
LOCAÇÃO ADEQUADA DOS INSTRUMENTOS

Na locação dos instrumentos destacam-se como recomendações mais importantes, para as barragens de concreto:

- ✓Evitar a todo custo a instalação de instrumentos no piso da galeria de drenagem;
- ✓Os PZ-piezômetros de tubo e EH-extensômetros de hastes devem ser preferencialmente inclinados para montante ou jusante, e instalados a partir de pequenos nichos deixados nas paredes da galeria;
- ✓Medição de recalques com os EH nos blocos de maior altura, ou com anomalias geológico-geotécnicas no maciço rochoso de fundação;
- ✓Medidores de vazão nas canaletas de drenagem da galeria, em separado para cada uma das estruturas da barragem (TA, VT, MC, etc);
- ✓Distensão junto ao pé de montante da barragem. A seguir ilustra-se o esquema adotado na Barragem Principal de Itaipu, envolvendo blocos no leito do rio Paraná, com 180 m de altura.

LOCAÇÃO ADEQUADA DOS INSTRUMENTOS

Extensômetro Múltiplo junto ao pé de montante do Bloco F19/20 (seta), na Barragem Principal de Itaipu (Rosso et all/1997).



LOCAÇÃO ADEQUADA DOS INSTRUMENTOS

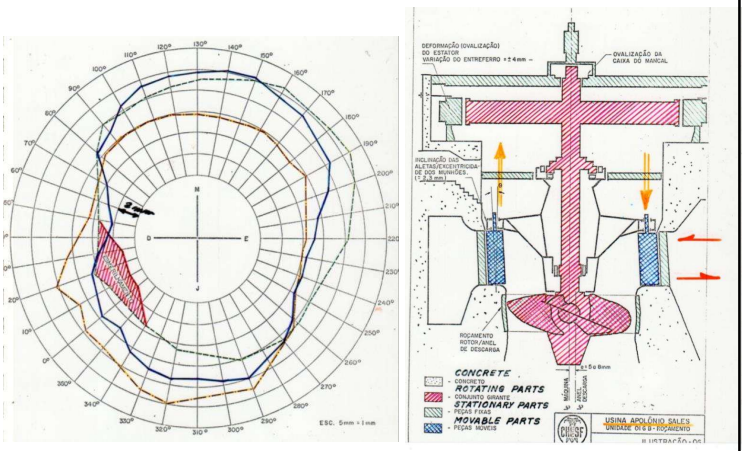
Instalação de PD - pêndulo direto em toda barragem de concreto com H > 40 m, pois são instrumentos de baixo custo, com vida útil compatível com a barragem e extremamente confiáveis e importantes na detecção de qualquer eventual problema que venha afetar o comportamento da barragem.



Dispositivo para medição deslocamentos verticais nos pêndulos

LOCAÇÃO ADEQUADA DOS INSTRUMENTOS

Usinas Hidrelétricas afetadas pela RAA, causam normalmente a tração das pás fixas do distribuidor, decorrentes da expansão do concreto no sentido vertical, assim como a inclinação da tampa da turbina em relação à sua base. Daí a importância da instalação de PD ou invertido, sempre que possível nas proximidades das unidades geradoras.



Seção transversal da unidade geradora, com a medição da ovalização indicada pelas folgas entre as pás da turbina e o anel de sucção (Silveira & outros, 1985)

LOCAÇÃO ADEQUADA DOS INSTRUMENTOS

INSTRUMENTS	PA-I	PA-II	PA-III
Multiple extensometer	3	8	7
Triorthogonal jointmeter	4	9	3
Embedded thermometer	3	3	3
Surface thermometer	3	3	3
Leveling bench mark	5	10	7
Weir gauge	2	2	2
TOTAL	19	34	24

Plano de instrumentação instalado inicialmente nas UHE Paulo Afonso I, II e II, afetadas por RAA (Silveira et all/2000).

LOCAÇÃO INADEQUADA DOS INSTRUMENTOS



Detalhe de um PD instalado sem os devidos cuidados, com o fio quase encostando na lateral do tubo de proteção, em uma UHE de grande porte.

INSTRUMENTOÇÃO - BARRAGENS DE TERRA

Para barragens de terra-enrocamento:

- ✓ Medidores triangulares de vazão deverão ser sempre instalados a jusante;
- ✓ Nas barragens com trecho central afogado pelo nível d'água a jusante, executar septos de argila na base das ombreiras, para possibilitar a instalação de pelo menos dois MV, um na ombreira direita e outro na esquerda;
- ✓ Nas barragens de maior altura geralmente é importante a instalação de MM- medidores magnéticos de recalque,
- ✓ Nas barragens de maior altura e sobre fundação de baixa resistência, importante a instalação de IN – inclinômetros verticais, até a rocha de fundação;
- ✓ Sempre recomendável a instalação de PZ para a medição da carga a montante do filtro horizontal;
- ✓ É importante nas barragens com junta de construção no aterro, a instalação de alguns PZ na região da interface entre as duas etapas de execução;
- ✓ Nas BEFC – barragens de enrocamento com face de concreto, é importante a medição da deflexão da laje a montante, assim como de seus recalques e deslocamentos horizontais a jusante.

AVALIAÇÃO PRÉVIA DOS VALORES DE CONTROLE DA INSTRUMENTAÇÃO

- Uma avaliação prévia dos Valores de Controle (Atenção e Alerta) deve ser realizada já na fase de projeto básico da instrumentação, de modo a possibilitar, na etapa subsequente, a adequada seleção dos instrumentos mais adequados e a definição dos parâmetros a serem monitorados.

- A ocorrência de valores que venham ultrapassar o campo de leitura do instrumento poderá vir a colocá-lo fora de operação.

AVALIAÇÃO PRÉVIA DOS VALORES DE CONTROLE DA INSTRUMENTAÇÃO

Com base na experiência adquirida na instrumentação de dezenas de barragens no Brasil, já é possível estimar os valores máximos esperados para novas estruturas a partir dos parâmetros observados em barragens existentes, destacando-se os seguintes:

- ✓ Abertura das juntas de contração entre blocos (MTJ);
- ✓ Recalque diferencial entre blocos nas juntas de contração (MTJ);
- ✓ Vazões especificas de drenagem (l/min/ml) para barragens de concreto;
- ✓ Vazões especificas de drenagem (l/min/ml) para barragens de terra-enrocamento;
- ✓ Poro-pressão na interface concreto-aterro;
- ✓ Poro-pressão no núcleo argiloso das barragens de enrocamento etc

SELEÇÃO DOS PARÂMETROS A SEREM MEDIDOS – BARRAGENS DE CONCRETO

Dentre os parâmetros medidos pela instrumentação das barragens de concreto, destacam-se os seguintes, particularmente para as de grande porte:

- ✓ Subpressões na fundação;
- ✓ Vazões de drenagem nas galerias;
- ✓ Deslocamentos verticais “absolutos”;
- ✓ Deslocamentos verticais relativos;
- ✓ Deslocamentos diferenciais entre blocos;
- ✓ Temperatura do concreto;
- ✓ Tensões internas no concreto, em regiões mais solicitadas;
- ✓ Tensões nos cabos de proteção (eventual).

SELEÇÃO DOS PARÂMETROS A SEREM MEDIDOS – BARRAGENS DE TERRA

Dentre os parâmetros medidos pela instrumentação das barragens de terra-enrocamento, destacam-se os seguintes, particularmente para as de grande porte:

- ✓Subpressões na fundação;
- ✓Poro-pressão (pressão neutra) no aterro;
- ✓Vazões de drenagem a jusante;
- ✓Recalques da fundação;
- ✓Recalques do aterro na construção;
- ✓Sobre-elevação da crista;
- ✓Deslocamentos horizontais da barragem/fundação;
- ✓Deslocamentos superficiais.

SELEÇÃO DOS INTRUMENTOS E DETERMINAÇÃO DE SUAS CARACTERÍSTICAS

Apresentam-se, a seguir, as principais características dos instrumentos de medição. Maiores detalhes sobre esses conceitos, bem como sobre os diversos tipos de erros que podem afetar a interpretação das leituras

- ✓Conformidade;
- ✓Acurácia;
- ✓Precisão;
- ✓Resolução;
- ✓Campo de leitura (*range*);
- ✓Amplitude (*span*);
- ✓Repetibilidade;
- ✓Linearidade;
- ✓Histerese;
- ✓Sinal de saída (*output signal*).



Preciso mas sem acurácia | Não preciso mas a média é acurada | Preciso e acurado

Acurácia: Acurácia representa o grau de aproximação de uma medida em relação ao valor real (absoluto) da grandeza medida. Acurácia é sinônimo de grau de exatidão.

Precisão: Representa o teor de aproximação de cada número de uma série de medições similares, em relação à média aritmética. Precisão é sinônimo de *reprodutibilidade* ou *repetibilidade*. É comum se expressar a precisão como ± um número.

SELEÇÃO DOS INTRUMENTOS E DETERMINAÇÃO DE SUAS CARACTERÍSTICAS

- Em muitas das barragens recentemente inspecionadas, têm sido observadas falhas grosseiras na instalação dos instrumentos

- Detalhes da instalação de extensômetros múltiplos de hastes e de piezômetros de tubo na fundação de uma barragem de concreto em operação há cerca de 10 anos. Embora pareça difícil de acreditar, esses instrumentos foram instalados em grandes blocos de concreto posicionados na região central da galeria.



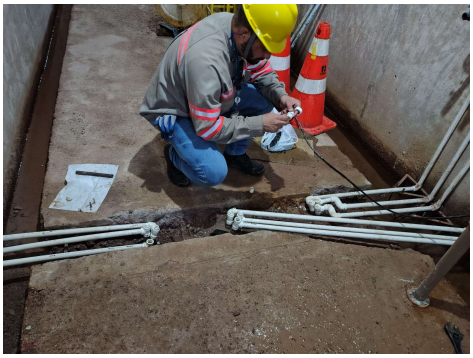
Grandes blocos de concreto obstruindo a galeria para a instalação dos EH e PZ



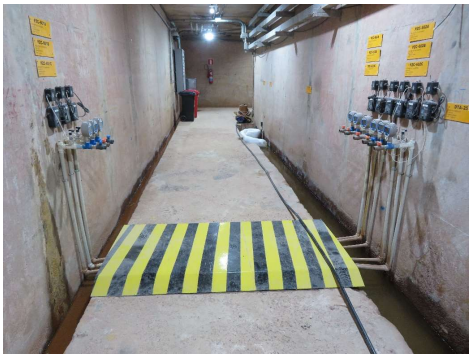
Detalhe da instalação dos PZ em barragem de concreto, obstruindo a galeria

INSTALAÇÃO EXECUTADA COM FALHAS

Instalação a partir das paredes de montante e de jusante da galeria, prevendo-se, já na fase de projeto, pequenos nichos laterais para sua instalação, conforme prática adotada desde a década de 1970 na instrumentação de barragens de concreto.



Corte do piso para passagem das tubulações dos PZ's



Detalhe da reinstalação dos PZ após sua correta reinstalação

INSTALAÇÃO EXECUTADA COM FALHA



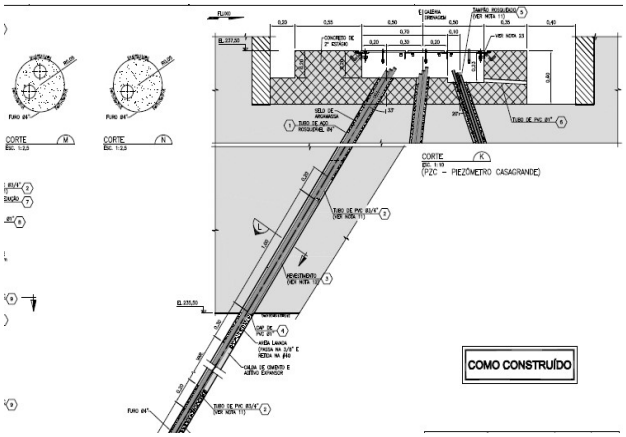
Após a remoção do bloco de concreto e das hastes dos EMH, detalhe dos furos vazios, sem qualquer tipo de vedação



Detalhe de extensômetros de hastes bem instalados na lateral da galeria de drenagem. Barragem executada na década de 80

PROJETO EXECUTADO COM FALHAS

- Outra falha observada com frequência na instalação de piezômetros no contato concreto/rocha (C/R) refere-se à indicação, nos desenhos de projeto, da cota teórica de instalação.
- Em função das operações de limpeza da fundação e da remoção de trechos mais fraturados da rocha, a cota final de concretagem frequentemente difere daquela prevista em projeto, tornando-se geralmente mais baixa



Detalhe de falha de projeto na instalação de PZ no contato C/R

LEITURAS BEM EXECUTADAS (TÉCNICO COM EXPERIÊNCIA)

- A experiência adquirida em meados da década de 1970 na instrumentação da barragem da UHE Água Vermelha, localizada no rio Grande, na divisa entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais, evidenciou a importância da experiência prévia dos leituristas em obras similares, como na UHE Ilha Solteira.

ELABORAÇÃO DE UM BOM RELATÓRIO DE INSTALAÇÃO

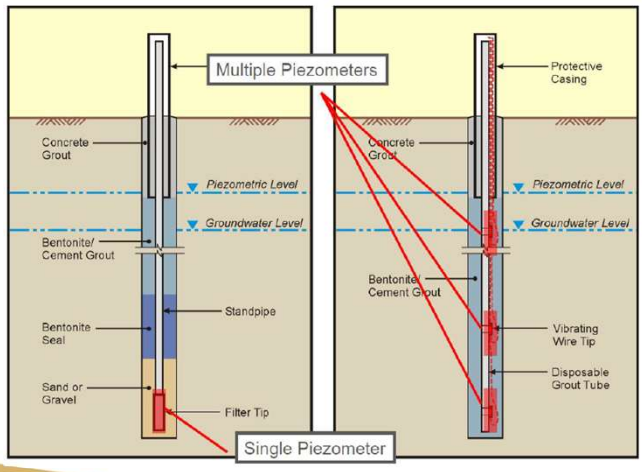
- Nas barragens mais recentes, quando se solicita à empresa responsável pela instalação dos instrumentos os respectivos relatórios de instalação, a resposta usual é que a instrumentação foi executada conforme o projeto. Entretanto, a experiência acumulada ao longo de cinco décadas nessa área demonstra que é praticamente impossível instalar os instrumentos exatamente nas cotas teóricas previstas.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS ELÉTRICOS EM FUROS PREENCHIDOS COM BENTONITA-CIMENTO

- Os piezômetros do tipo tubo aberto (*standpipe*) são instrumentos extremamente simples, confiáveis e de baixo custo. Entretanto, exigem procedimentos de instalação relativamente demorados, o que dificulta a instalação de dois PZs em um mesmo furo de sondagem.

- Inicialmente, destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Mikkelsen e Green, pesquisadores noruegueses que publicaram importantes estudos sobre instalação e desempenho de instrumentos geotécnicos, incluindo piezômetros e inclinômetros. Em 2003, esses autores publicaram um trabalho de referência sobre a instalação de piezômetros em furos totalmente preenchidos com uma mistura de bentonita e cimento, demonstrando a confiabilidade desse método de instalação

CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS ELÉTRICOS EM FUROS PREENCHIDOS COM BENTONITA-CIMENTO



Esquema a esquerda da instalação de PZ tradicional, e a direita da instalação de PZE em esquema contínuo, ao longo de uma sondagem (Allen Marr/2024).

CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS ELÉTRICOS EM FUROS PREENCHIDOS COM BENTONITA-CIMENTO

Importante destacar que a técnica de instalação de PEs (piezômetros elétricos) com sensores de corda vibrante de forma continua, apresenta dentre outras as seguintes vantagens:

- ✓ A instalação é mais simples;
- ✓Redução do tempo de instalação e dos custos envolvidos;
- ✓Eliminação do risco de falhas associadas ao trecho preenchido com areia;
- ✓Redução do tempo de resposta das medições.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS ELÉTRICOS EM FUROS PREENCHIDOS COM BENTONITA-CIMENTO

Relacionam-se alguns aspectos adicionais relevantes:

✓A ativação do transdutor de corda vibrante requer uma variação volumétrica muito pequena;
✓Na prática, praticamente não há necessidade de fluxo de água do solo para o sensor, para que a transmissão de pressão;
✓A variação de pressão propaga-se à velocidade do som e não depende da permeabilidade ou dos materiais. Essa hipótese é válida desde que o meio esteja completamente saturado, como ocorre no maciço de fundação de barragens de concreto e nas barragens de terra abaixo da linha freática.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS ELÉTRICOS EM FUROS PREENCHIDOS COM BENTONITA-CIMENTO

Resultados de ensaios reportados na Referência 3 por Mikkelsen e G.E. Green, comparando a resposta ao aumento de carga medida por células de pressão e por piezômetros elétricos de corda vibrante

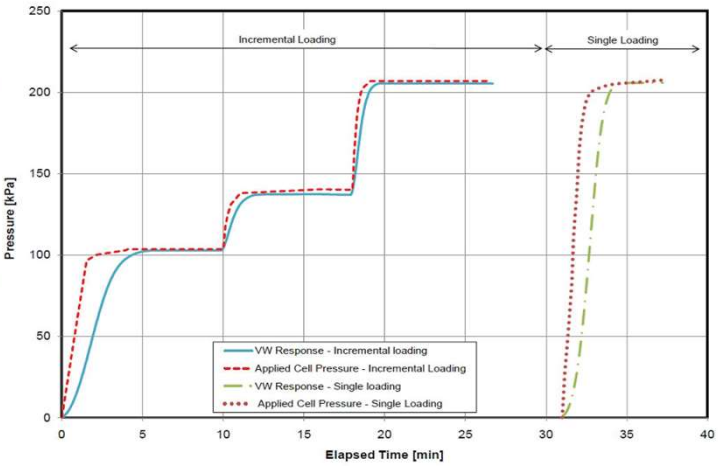


Gráfico mostrando a rápida resposta dos PZE a variações na pressão hidrostática (P.E. Mikkelsen e G.E. Green (2003)

CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS ELÉTRICOS EM FUROS PREENCHIDOS COM BENTONITA-CIMENTO

Dentre os cuidados recomendados na instalação, destacam-se:

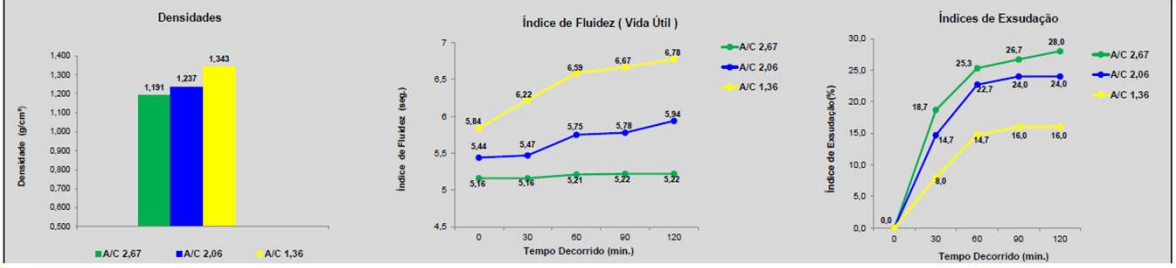
- Requer a injeção do mix de calda apropriado de baixo para cima, assim como os corretos procedimentos de instalação dos cabos elétricos;
- O transdutor de pressão pode ser danificado por altas pressões de injeção, devendo-se evitá-las.
- A calda de bentonita-cimento para 10 litros de água, deve apresentar traço em torno de (10:1,5:1,0):
- A adição do cimento, até em pequenas quantidades, neutraliza as propriedades expansivas da bentonita, assim que ocorre a ligação dos componentes, recomendando-se a utilização de teores da ordem de 10% de cimento.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS ELÉTRICOS EM FUROS PREENCHIDOS COM BENTONITA-CIMENTO

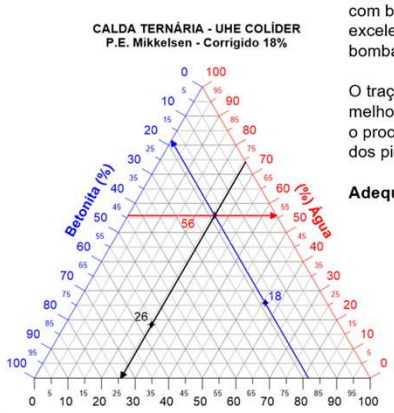
Número de Série	Data da Moldagem	Hora da Mistura	Temp. Amb.	Temp. Água	Temp. Cimento	Temp. Calda	Materiais (kg)					Aditivos (%)		Propriedades				Resistências (MPa)			Rendimento (Mpa / kg / m³)		
							Cimento Equivalente (kg)	Cimento Prático (kg)	Betonita (kg)	Água (Lts)	Relação A/C	Powerflow 3000 (g)	Centrament VMA (g)	Fluidez Inicial (seg)	Fluidez após 120 minutos (seg)	Densidade (g/cm³)	Exsudação (%)	3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias
COL-1150	14/05/2026	13:40	31,0	30,0	33,0	31,0	1,73	1,73	1,0	7,27	2,67	-	-	5,16	5,22	1,191	1,5				-	-	-
COL-1200	03/06/2026	13:25	32,0	30,0	29,0	30,0	2,27	2,27	1,0	6,73	2,06	-	-	5,44	5,94	1,237	2,0				-	-	-
COL-1300	03/06/2026	13:40	32,0	31,0	29,0	32,0	3,23	3,23	1,0	5,77	1,36	-	-	5,84	6,78	1,343	2,7				-	-	-

Materiais	Densidade (kg/dm³)
ITAU - VOTORANTIM CIMENTOS - CPII-F32	3,00
PERMAGEL - BENTONIT UNIÃO	1,18

Observações:
Resumo dos Estudos de Caldas Ternárias - UHE-COLIDER
Calda A/C-2,67 ; A/C-2,06 e A/C-0,1,36



CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS ELÉTRICOS EM FUROS PREENCHIDOS COM BENTONITA-CIMENTO



NOTAS:
Pontos Favoráveis: O traço corrigido com 18% de bentonita, reduziu o cimento e o fator A/C, obtendo uma mistura densa, com boa homogeneidade, estabilidade e viscosidade com excelente capacidade de bombabealidade, para furos com bomba de pistão mecânica disponível no site da obra;

O traço deve apresentar uma melhor resistência a segregação e melhor comportamento frente aos fluxos de artesianismo durante o processo de injeção e confinamento dos furos de instalação dos piezômetros multinível.

Adequado, para solos médios e rígidos.



CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS ELÉTRICOS EM FUROS PREENCHIDOS COM BENTONITA-CIMENTO



Implantação de PZE em furo vertical junto ao piso da galeria.



Detalhe da fixação de um dos PZE ao tubo *tremie durante* a instalação.

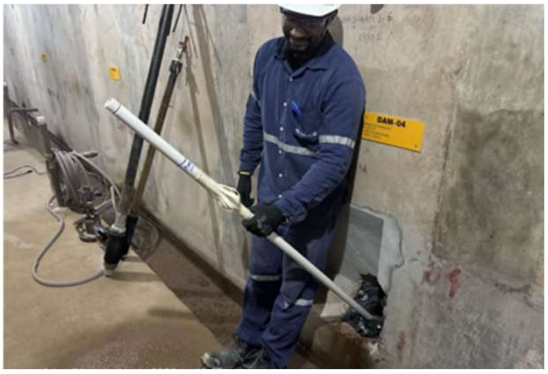


Término da instalação de três PZE no piso da galeria de drenagem em barragem em CCR.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS ELÉTRICOS EM FUROS PREENCHIDOS COM BENTONITA-CIMENTO

SBB ENGENHARIA
Segurança Básica de Barragens

SIB
SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS



Descida do tubo tremie de fixação da instrumentação e injeção de preenchimento com a calda de bentonita-cimento.



Instalação de outros três PZE em sondagem inclinada para jusante na galeria de drenagem.

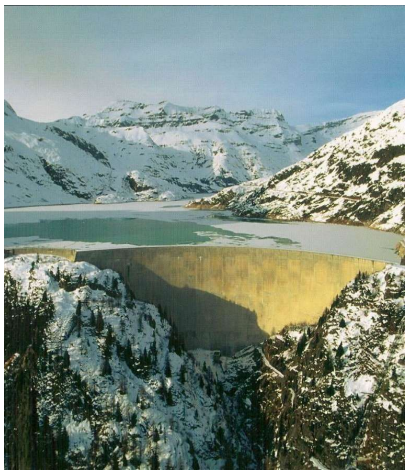
MUITO OBRIGADO

MUCHAS GRACIAS

THANK YOU VERY MUCH

CIGB ICOLD CBDB

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



Barragem em arco de Emosson, Suíça.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.2
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

ESTUDO DE CASO: INSTRUMENTAÇÃO APLICADA EM UM ATERRO EXPERIMENTAL DE PDER DE MINÉRIO DE FERRO

Isabela SILVA
Msc. Eng. Civil Geotécnica - G5 Engenharia

Gabriel FERREIRA
Engenheiro Civil - G5 Engenharia

Victor LIEVANO
Dr. Eng. Civil Geotécnico - G5 Engenharia

Joaquim DUARTE
Msc. Eng. Civil Geotécnico - G5 Engenharia

RESUMO

A utilização de pilhas de disposição de estéril e rejeito (PDER) tem se expandido na mineração brasileira, demandando maior rigor no controle ambiental e na segurança estrutural. Nesse contexto, a instrumentação geotécnica automatizada surge como uma solução essencial para o monitoramento contínuo e a avaliação confiável do comportamento do maciço. O emprego de *dataloggers* otimiza a frequência de aquisição de dados e mitiga erros operacionais inerentes às leituras manuais. Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre a implantação de um sistema de monitoramento em um aterro experimental de minério de ferro. A instrumentação focou na instalação de instrumentos com medição de tensões totais, pressões neutras, sucção e umidade em solos não saturados. O objetivo central é demonstrar a importância da automação e de protocolos rigorosos de controle de qualidade, desde a fase de instalação até a coleta de dados. Os resultados indicam que a validação prévia em testes de bancada, a precisão das leituras iniciais, a proteção física dos cabos e a correta parametrização do sistema são determinantes para o sucesso do monitoramento. Conclui-se que a instrumentação automatizada, quando executada sob diretrizes técnicas rigorosas, é uma ferramenta estratégica para a segurança operacional e para o aprimoramento da gestão de rejeitos na indústria mineral.

ABSTRACT

The use of waste rock and tailings disposal piles (PDER) has expanded in Brazilian mining, demanding stricter environmental control and structural safety. In this context, automated geotechnical instrumentation emerges as an essential solution for continuous monitoring and reliable evaluation of the soil mass behavior. The use of dataloggers optimizes data acquisition frequency and mitigates operational errors inherent to manual readings. This paper presents a case study on the

implementation of a monitoring system in an experimental iron ore embankment. The instrumentation focused on the installation of sensors to measure total stresses, pore pressure, suction, and moisture in unsaturated soils. The central objective is to demonstrate the importance of automation and rigorous quality control protocols, from the installation phase to data collection. The results indicate that prior validation through bench tests, the accuracy of initial readings, physical cable protection, and correct system parameterization are decisive factors for monitoring success. It is concluded that automated instrumentation, when executed under strict technical guidelines, is a strategic tool for operational safety and the improvement of tailings management in the mineral industry.

1. INTRODUÇÃO

O setor mineral brasileiro tem aumentado a utilização de sistema de disposição em pilhas do tipo de codisposição de estéril e rejeito (PDER) como alternativa às barragens convencionais, visando maior controle ambiental. As pilhas do tipo codisposição utilizam estéreis e rejeitos de forma combinada gerando melhoria em seu comportamento através do preenchimento dos espaços vazios presentes nos fragmentos grosseiros através de seu material mais fino [1].

[2] citam que pilhas de mineração, geralmente, estão sob condições não saturadas. O nível freático marca o horizonte de pressão intersticial zero no interior do maciço, abaixo dela a pressão da água nos poros aumenta hidrostaticamente em regime permanente e, acima do nível freático, a água percorre os espaços do solo devido à ação capilar [3], criando pressões intersticiais negativas devido à tensão superficial da água. Essa pressão intersticial negativa (denominada sucção) aumenta uniformemente do nível freático até o topo da zona capilar saturada em condições de regime permanente. A zona capilar pode ser espessa para solos de granulação fina, como silte e argila, ou pequena para solos de granulação grossa, isto é, areia, rocha, estéril [4]. [5] citam que a precipitação, a evaporação e a evapotranspiração são importantes mecanismos naturais que influenciam a profundidade e a extensão das zonas não saturadas. A estabilidade dessas estruturas em solos não saturados é regida pelo regime de pressões neutras e sucção.

A instrumentação geotécnica é essencial para monitorar o comportamento das estruturas e validar premissas de projeto, possibilitando verificar a segurança das estruturas sempre que há uma dúvida sobre seu funcionamento. Por isso, ela deve ser projetada especificamente para cada situação e material utilizado.

O monitoramento de solos não saturados exige uma abordagem instrumental distinta e mais complexa, uma vez que o comportamento mecânico e hidráulico é governado pela sucção mátrica [6]. A utilização de tensiômetros e sensores de umidade, aliada às células de pressão total e piezômetros, possibilita validar os modelos de fluxo e estabilidade em estruturas de solo compactado, como os aterros experimentais de PDER.

Instrumentos elétricos, especialmente os de corda vibrante, oferecem respostas rápidas quando instalados diretamente no solo e são superiores aos sistemas manuais por permitirem a automação, essencial para captar variações transientes de umidade e carga em tempo real sem ação do operador. Os *dataloggers* foram os dispositivos eletrônicos utilizados para aquisição e armazenamento dos dados provenientes dos sensores instalados. Esses equipamentos constituem parte essencial dos sistemas modernos de monitoramento, permitindo o acompanhamento contínuo do comportamento da estrutura. Muitos sistemas também possibilitam alimentação por bateria e painéis solares, tornando viável a operação em locais remotos.

A complexidade do entendimento do comportamento dos solos não saturados exige análise rigorosa das interações entre pressões neutras e variações de umidade no maciço. Nesse cenário, a instrumentação geotécnica automatizada torna-se

indispensável, fornecendo a resolução temporal necessária para caracterizar as oscilações de tensões totais e poropressões que regem o desempenho das pilhas.

2. INSTRUMENTOS INSTALADOS

No aterro experimental da PDER foram instalados os seguintes instrumentos elétricos: piezômetros de corda vibrante, células de pressão total, tensiômetros e sensores de umidade. Para a automação dos sensores, foram utilizados *dataloggers* para leitura e armazenamento dos dados. Este item apresenta brevemente o funcionamento de cada instrumento.

2.1 Piezômetro de Corda Vibrante

Piezômetros são instrumentos utilizados para medir a poropressão que age no seu bulbo de instalação. Há diversos tipos de piezômetros sendo que para este projeto foi utilizado piezômetro de corda vibrante instalado diretamente no aterro.

De acordo com [7], o modelo utilizado converte a pressão da água em um sinal de frequência através de um diafragma e um fio de aço tensionado. Este piezômetro elétrico é projetado de forma que uma mudança na pressão sobre o diafragma cause uma mudança na tensão do fio. Quando excitado por uma bobina magnética, o fio vibra em sua frequência natural. A vibração do fio na proximidade da bobina magnética gera um sinal de frequência que é transmitido para o dispositivo de leitura. O dispositivo de leitura processa o sinal e exibe uma leitura. Fatores de calibração, que estabelecem uma relação entre a pressão aplicada ao diafragma e o sinal de frequência retornado ao dispositivo de leitura, são usados para converter as leituras em frequência para unidades de engenharia. A Figura 1 ilustra o piezômetro utilizado no estudo de caso.



Figura 1 – Piezômetro de corda vibrante

2.2 Células de Pressão Total

As células de pressão total medem as tensões do solo e a pressão da água nos poros. Assim, para obtenção da tensão efetiva é necessário medição simultânea da pressão da água nos poros, usando um piezômetro.

A célula de pressão é formada por duas placas circulares de aço inoxidável cujas bordas são soldadas para formar uma cavidade selada que é preenchida com um fluido incompressível. A célula é instalada com sua superfície sensível em contato direto com o solo. A pressão total aplicada a essa superfície é transmitida ao fluido dentro da célula e medida com um transdutor de pressão de fio vibratório [8]. A Figura 2 exibe a célula de pressão utilizada no estudo de caso.



Figura 2 – Célula de pressão total de corda vibrante

2.3 Tensiômetros

De acordo com o fabricante [9], o tensiômetro mede a resistência elétrica dentro de uma matriz granular para determinar a tensão da água no solo. Para medir a resistência dentro do sensor, normalmente é usado um circuito divisor de tensão. O circuito usa uma tensão de entrada conhecida, uma tensão de saída e o valor de um resistor em série para calcular o valor de outro resistor (o sensor). Uma vez que a resistência é conhecida, o valor é calibrado para a tensão da água no solo por meio de uma série de equações ou consultando tabelas de valores. O sensor pode ser lido por dispositivos analógico-digitais.

O sensor do tipo resistência elétrica utilizado fornece leituras de 0 a 200 centibares e quando em operação, a umidade do solo é constantemente absorvida ou liberada pelo sensor. À medida que o solo seca, a umidade do sensor é reduzida e a resistência elétrica entre os eletrodos aumenta. A resistência lida fornece uma leitura digital em centibares da sucção de água no solo. A Figura 3 exibe o tensiômetro utilizado que possui saída do tipo 0–5V.



Figura 3 – Tensiômetro analógico

2.4 Sensores de Umidade

O sensor de umidade utilizado é um instrumento de alta precisão e alta sensibilidade para medição da umidade do solo. O produto utiliza o princípio da tecnologia eletromagnética para medir a constante dielétrica do solo. Uma sonda de aço inoxidável é inserida na superfície ou perfil do solo para realizar a medição do teor volumétrico de umidade do solo. Esse método é um dos mais populares para medição de umidade do solo. Possui saída para leitura 4–20 mA, 0–5 V ou RS485. Recomenda-se calibração do sensor com as condições do local, quando possível, por meio de correlação com amostras de campo e ensaios laboratoriais, que tende a aumentar significativamente a representatividade dos dados obtidos [10].



Figura 4 – Sensor de umidade analógico

2.5 Dataloggers

Dataloggers são dispositivos eletrônicos utilizados para aquisição, armazenamento e, quando conectados a um sistema, transmissão automática de dados provenientes de sensores instalados em obras geotécnicas. Esses equipamentos constituem parte essencial dos sistemas modernos de monitoramento, permitindo o acompanhamento contínuo do comportamento de estruturas. Sua principal função é registrar as leituras em intervalos programados, garantindo séries históricas consistentes e reduzindo a dependência de medições manuais em campo. Assim, permitem monitoramento contínuo e em tempo real, maior frequência de aquisição de dados redução de erros operacionais de leitura manual, geração automática de alarmes quando limites predefinidos são ultrapassados, rastreabilidade e organização das séries históricas e apoio à tomada de decisão em situações críticas.

Para o estudo de caso apresentado foram utilizados dois tipos de *dataloggers* para possibilitar a aquisição de dados dos instrumentos elétricos e analógicos. O registrador de dados analógico [11] é um dispositivo de 4 canais que admite a maioria das entradas de sensores analógicos, permitindo que ele conecte facilmente qualquer transdutor de tensão, corrente e resistivo. Para os registradores de dados de corda vibrante [12] foi utilizado o de cinco canais, conectando os instrumentos corda vibrante ao sistema de monitoramento. Esse *dataloggers* são dispositivos autônomos alimentados por bateria com manutenção mínima necessária e são capazes de

transmitir dados via rádio de longo alcance para um concentrador de dados a até 15 km de distância.

A instalação dos dataloggers deve considerar acessibilidade, segurança física, qualidade do sinal de comunicação e proximidade em relação aos sensores monitorados. Em geral, os equipamentos são fixados em postes, estruturas metálicas, caixas técnicas ou suportes específicos, posicionados acima do nível do terreno e protegidos contra impactos, inundação, vandalismo e interferências operacionais.



(a) (b)

Figura 5 – *Datalogger*: (a) Para corda vibrante; (b) Para sensor analógico

3. INSTALAÇÃO DOS INSTRUMENTOS: O FATOR QUALIDADE

A confiabilidade da instrumentação geotécnica é iniciada previamente a sua instalação, para isso, todos os sensores foram submetidos à inspeção visual, testes de bancada, com verificação de funcionamento e comparação das leituras com os dados de calibração e fichas do fabricante, permitindo identificar inconsistências ou danos prévios. A inspeção visual deve ser completa, incluindo corpo, conexões, sensores e cabos. Para todos os sensores foram feitos testes elétricos, de comunicação e leitura no *datalogger*. A Figura 6 exibe exemplos de teste de bancada realizados previamente a instalação dos sensores. Neste estudo de caso foi identificado um sensor com avaria.

A definição dos pontos instrumentados é uma definição de projeto, sendo essencial o controle de coordenadas, cotas e profundidades durante a instalação. Os pontos devem ser devidamente identificados em campo e registrados topograficamente para garantir rastreabilidade.

A proteção dos cabos é fundamental para o desempenho do sistema e devem ser evitadas dobras acentuadas, tração e danos mecânicos. Os cabos podem ser instalados em valas ou eletrodutos, com proteção em material fino compactado, isento de pedras, e ser devidamente identificados. Recomenda-se o uso de selos de bentonita para evitar fluxos preferenciais ao longo das instalações. As extremidades dos cabos foram conduzidas até o *datalogger* garantindo proteção contra umidade.

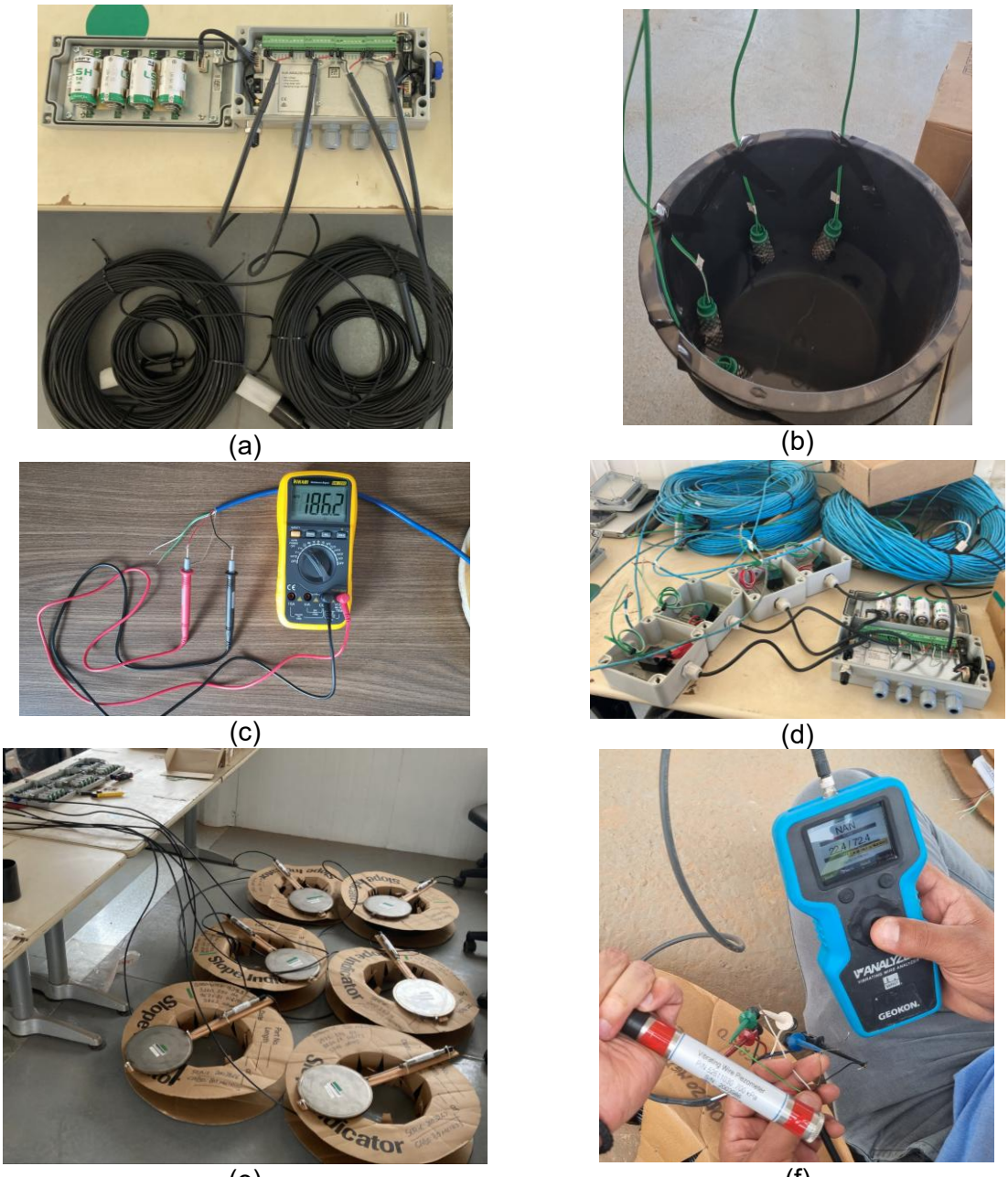


Figura 6 – Exemplos de teste de bancada realizados

3.1 Piezômetro de Corda Vibrante

A instalação de piezômetros em aterros exige planejamento executivo e controle de campo, uma vez que a qualidade da instrumentação depende diretamente dos procedimentos adotados antes, durante e após a implantação. Inicialmente, houve a

confirmação das especificações de projeto, bem como a inspeção funcional dos equipamentos, cabos e conexões. Durante todo o processo o piezômetro deve ser manuseado com cuidado, evitando impactos mecânicos e danos ao diafragma sensor.

Antes da instalação, o elemento filtrante foi preparado adequadamente. Neste caso, o piezômetro de corda vibrante utilizado é do tipo convencional, por isso, a saturação de sua pedra porosa foi realizada por meio do preenchimento do espaço destinado no instrumento com água limpa e posterior reinstalação do filtro. Esse procedimento visa minimizar a presença de ar no sistema e melhorar a resposta inicial do sensor.

A Figura 7 exibe o passo-a-passo da instalação do piezômetro elétrico de corda vibrante: saturar a pedra porosa do sensor e mantê-lo saturado; realizar leitura inicial sem que haja contato com o revestimento metálico do sensor; inserção do sensor no invólucro com areia saturada; fechamento do invólucro com acompanhamento da leitura; realização do furo para instalação do piezômetro com forro de areia; instalação do sensor com preenchimento do espaço com areia saturada; fechamento do furo com escolta de cabo com acompanhamento da leitura.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 7 – Passo-a-passo para instalação do piezômetro de corda vibrante: (a) saturação da pedra porosa do sensor; (b) realização da leitura inicial; (c) inserção do sensor no invólucro; (d) fechamento do invólucro; (e) execução do furo; (f) instalação do sensor; (g) fechamento do furo.

Importante que a instalação do sensor ocorra de forma cuidadosa em maciços que podem estar com pressão neutra, evitando sobrepressões no diafragma e para isso, sempre que possível deve-se fazer o acompanhamento da leitura para este controle.

Após a instalação, as primeiras leituras devem ser interpretadas com cautela, pois o os métodos de perfuração e instalação podem alterar temporariamente as pressões neutras do maciço e o restabelecimento do regime hidráulico pode demandar algumas horas até várias semanas, dependendo da permeabilidade do solo. Assim, recomenda-se considerar como leitura de referência apenas os valores estabilizados ao longo de um período contínuo de monitoramento.

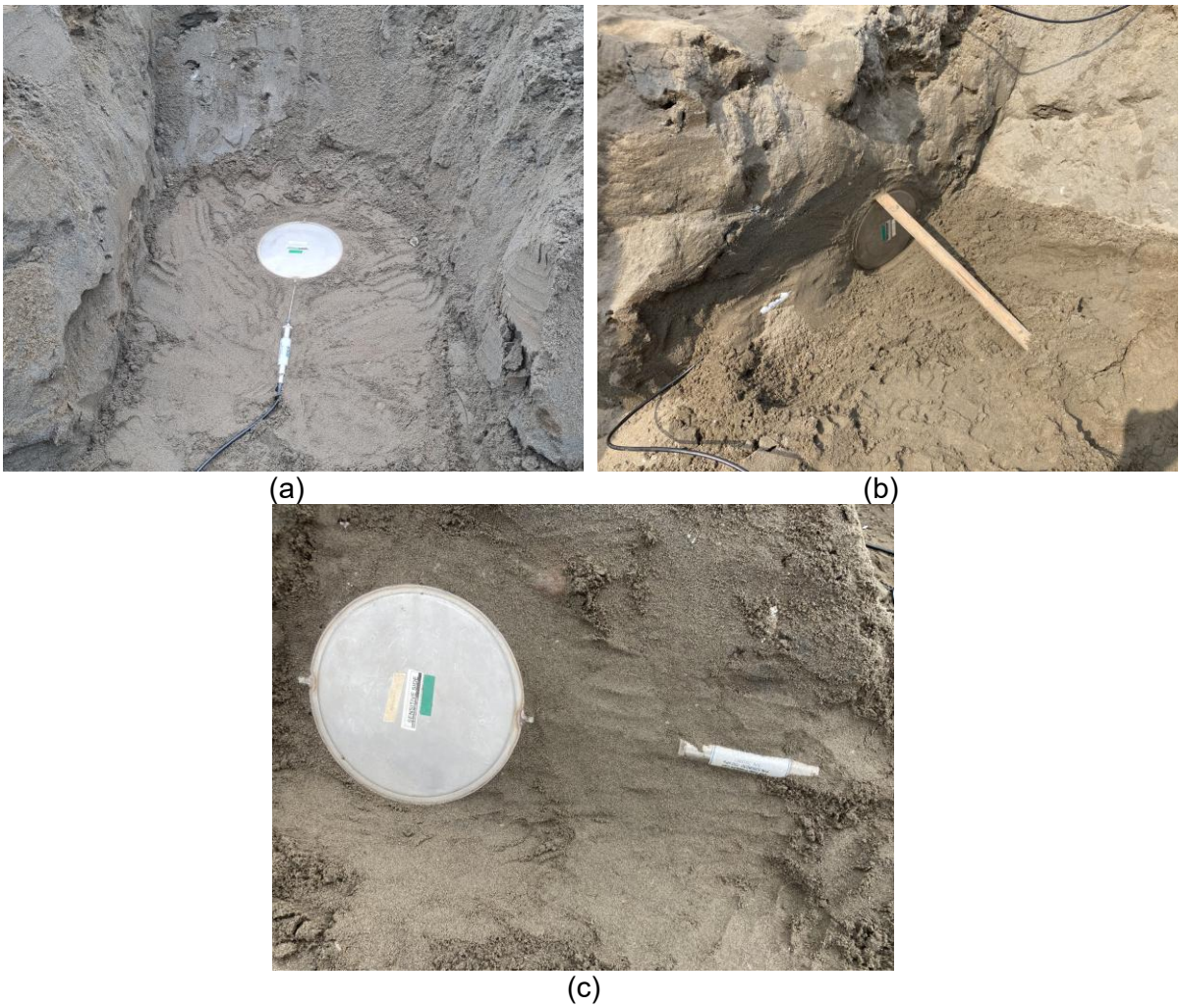
3.2 Células de Pressão Total

A instalação de células de pressão total em aterros deve ser executada com rigor técnico, de forma a garantir que as tensões medidas sejam representativas do comportamento real do maciço e não sofram interferências decorrentes de procedimentos inadequados de implantação. A instalação foi realizada durante a execução do aterro, em cotas definidas previamente em projeto.

Inicialmente, ocorreu a escavação de uma cava com aproximadamente 1,0 m de profundidade na camada já executada do aterro. Essa escavação permitiu acomodar todas as células previstas no trecho instrumentado, mantendo-se espaçamento mínimo entre instrumentos (a recomendação do fabricante de pelo menos 1,0 m [8] a fim de evitar interferência entre medições e facilitar os trabalhos de instalação. O fundo da escavação foi cuidadosamente regularizado, nivelado e recomposto por compactação controlada, de modo a constituir uma base estável e homogênea sem material pedregulhoso ou fragmentos rígidos no contato com o sensor evitando concentrações localizadas de tensões e danos.

Os nichos individuais de instalação possuíram dimensões superiores às do instrumento permitindo adequado posicionamento e recomposição do material envolvente. Uma das faces do nicho foi mantida plana e regular para garantir a correta orientação da célula conforme a direção principal de tensões de interesse que para

este estudo de caso foi uma célula de pressão na horizontal, outro na vertical e a terceira inclinada a 45º conforme exibido na Figura 8. Após o posicionamento da célula no local previsto foi realizada a verificação funcional imediata através de leitora portátil, confirmando a obtenção de leitura estável antes do reaterro. Em seguida, procedeu-se com a execução do reaterro, sendo indicado utilizar o próprio solo escavado, desde que isento de material pedregulhoso e mantido com teor de umidade e compactação compatível ao material adjacente. Esse cuidado é fundamental para preservar a continuidade mecânica do maciço e minimizar perturbações locais. Recomenda-se que o reaterro inicial seja executado em camadas de baixa espessura (10 a 20 cm) e compactadas com equipamentos manuais ou de baixa energia até cerca de 1,0 m de reaterro, de modo a evitar deslocamentos, impactos ou sobrecargas prematuras sobre as células e cabos.



(a) (b)

(c)

Figura 8 – Instalação de células de pressão total de corda vibrante em 3 diferentes direções: (a) horizontal; (b) vertical; (c) inclinada a 45 graus

3.3 Tensiômetros

A pedra porosa cerâmica do sensor foi previamente saturada com água desaerada, de modo a eliminar bolhas de ar e garantir adequada transmissão da pressão negativa entre o solo e o espaço interno do instrumento.

A instalação do tensiômetro seguiu os seguintes passos conforme exibido na Figura 9: execução do furo de instalação que deve ser inclinado com diâmetro ligeiramente superior ao instrumento, preservando a estrutura do solo adjacente e evitando alargamentos excessivos e seu fundo deve estar na cota de instalação do instrumento; o tensiômetro foi envolto com uma cobertura composta por material compatível ao circundante (rejeito e água), de forma que fique sólida e estável no fundo do furo com o objetivo de promover íntimo acoplamento entre a cápsula porosa e o solo circundante, eliminando vazios que comprometam a leitura; o sensor foi posicionado no furo de instalação e introduzido cuidadosamente até a profundidade prevista, garantindo a correta orientação e o posicionamento da cápsula sensora na zona de interesse; realizado o fechamento manual do furo com material compatível ao circundante.

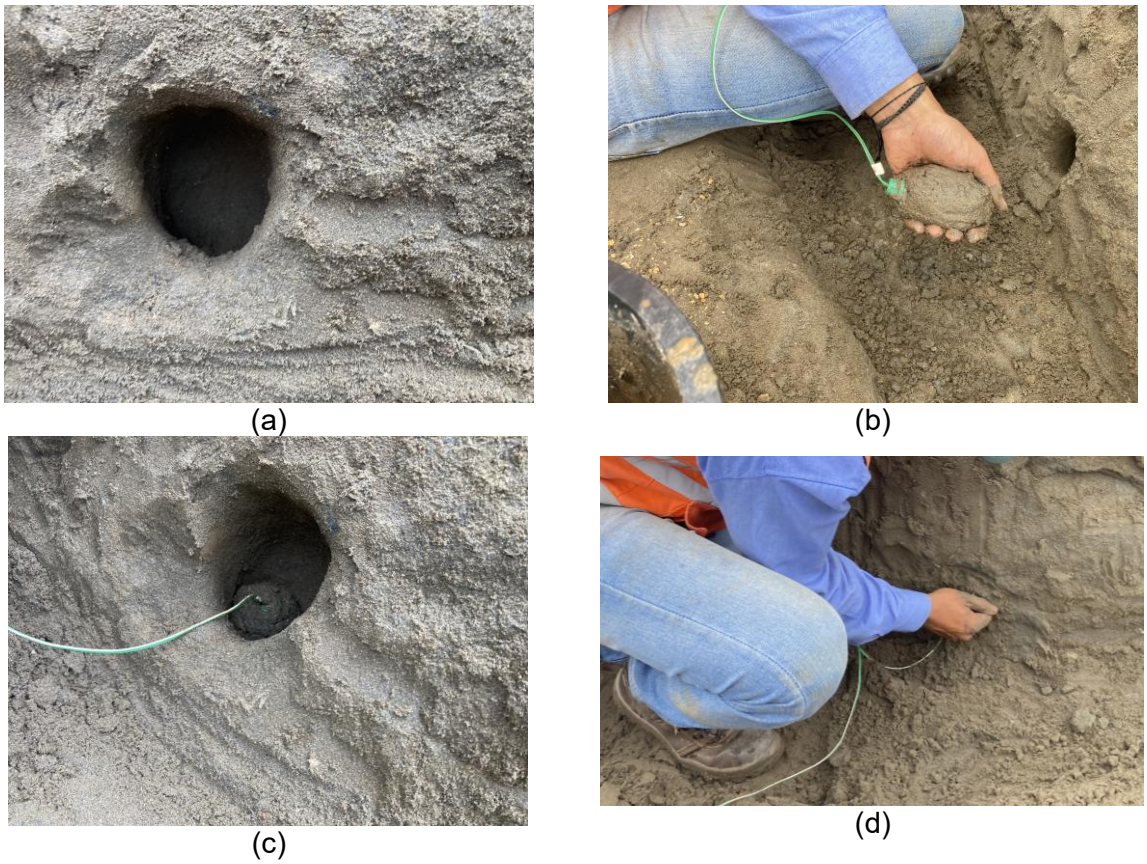


Figura 9 – Passo-a-passo para instalação do tensiômetro: (a) execução do furo de instalação; (b) envolvimento do tensiômetro em material compatível ao circundante; (c) posicionamento do sensor no furo; (d) fechamento manual do furo

3.4 Sensores de Umidade

A instalação pode ser executada durante a construção do aterro ou por meio de perfuração localizada em trechos concluídos. Este sensor é o que possui instalação mais simples que é realizada por meio da cravação das hastes de medição firmemente no solo, assegurando contato entre as hastes metálicas e o material circundante, condição essencial para a confiabilidade das leituras, pois vazios, desagregações ou zonas soltas ao redor do instrumento podem introduzir erros significativos nos valores registrados.

Após sua instalação, o reaterro no entorno do sensor foi realizado pelo mesmo material e mantido em umidade e compactação compatível com o restante através de compactação manual controlada nas proximidades imediatas do instrumento. Essa medida buscou restabelecer as características locais do maciço sem provocar danos mecânicos ao equipamento. Também após a instalação, há um período inicial de estabilização das leituras, no qual o solo recomposto ao redor do sensor readquire equilíbrio hídrico e estrutural.



Figura 10 – Instalação sensor de umidade

3.5 Dataloggers

O *datalogger* atua como interface entre o sensor e a plataforma de supervisão. O equipamento recebe o sinal proveniente do instrumento, converte-o em informação digital, armazena as leituras em memória interna e posteriormente transmite os dados por redes de comunicação de longo alcance caso façam parte de um sistema mais robusto de transmissão de dados. No estudo de caso apresentado, estes equipamentos foram utilizados para aquisição e armazenamento das leituras, sendo as leituras armazenadas recolhidas através da conexão com dispositivo móvel. A localização foi estabelecida para garantir a segurança física, manutenção futura e inspeções periódicas. A Figura 11 exibe a instalação dos *dataloggers* em uma cabine, no entanto, eles possuem invólucros robustos com grau de proteção IP67 ou IP68 que são adequados para ambientes agressivos de campo podendo ficar expostos ao tempo. Durante a instalação foram dados os cuidados quanto à integridade dos cabos e vedação das entradas.

Para o correto funcionamento do sistema de monitoramento, é necessário a consulta aos manuais técnicos tanto do instrumento quanto do datalogger, de modo a assegurar a compatibilidade entre os equipamentos e a correta conexão do sensor ao canal de leitura correspondente. A adequada parametrização elétrica e lógica de cada entrada, incluindo tipo de sinal, faixa de operação e configuração de leitura, é fundamental para evitar erros de aquisição, leituras inconsistentes ou danos aos componentes.



Figura 11 – *Dataloggers:* (a) Cabine de leitura; (b) Identificação dos canais

4. CONCLUSÕES

Em síntese, a eficiência de um sistema de monitoramento geotécnico em aterros depende da adequada instalação, proteção e integração de todos os seus componentes que neste estudo de caso incluiu piezômetros, células de pressão total, tensiômetros, sensores de umidade e *dataloggers*. O desempenho confiável desses instrumentos está diretamente associado ao correto posicionamento em campo, ao controle geométrico da implantação, à preparação adequada dos elementos sensores através da inspeção, dos testes de bancada e das leituras iniciais, bem como a proteção física de cabos e conexões e correta parametrização dos sistemas de aquisição de dados. Após a instalação, o acompanhamento das leituras iniciais é indispensável para identificar eventuais anomalias ou efeitos transitórios decorrentes da execução. O estudo de caso apresentou a instalação de sensores como piezômetro, célula de pressão total, tensiômetros e sensores de umidade que quando observadas as recomendações de projeto e dos fabricantes, passam a fornecer dados consistentes sobre pressões neutras, tensões internas, condições de umidade e comportamento hidráulico do maciço, contribuindo para a calibração de modelos geotécnicos, controle construtivo, avaliação de desempenho, gestão de riscos e segurança global da obra.

5. PALAVRAS-CHAVE

Instrumentação geotécnica, PDER, aterro experimental, aterro não saturado.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a G5 Engenharia pela oportunidade da atuação neste projeto e desenvolvimento deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GONTIJO, M. D. (2021) – “Manuseio e aproveitamento de estéreis em mineração”, Revista Engenharia de Interesse Social — REIS, v. 6, n. 8, p. 104–116.

[2] NELSON, J. D., & MCWHORTER, D. B. (1985) – “Water Movement Design of non-impounding minewaste dumps (p. 99)”. Society for Mining Metallurgy.

[3] FREDLUND, D. G., & RAHARDJO, H. (1993) – “Soil mechanics for unsaturated soils.” Wiley-Interscience.

[4] MAKNOON, M. (2016) – “Slope Stability Analyses of Waste Rock Piles Under Unsaturated Conditions Following Large Precipitations”. Tese de doutorado, École Polytechnique de Montréal.

[5] Lu, N., & Likos, W. J. (2004). – “Unsaturated soil mechanics”. Wiley, Hoboken, NJ.

[6] FREDLUND, D.G., RAHARDJO, H., & FREDLUND, M.D. (2012) – “Unsaturated soil mechanics in engineering practice”. John Wiley & Sons.

[7] SLOPE INDICATOR COMPANY (2013) – “VW Piezometer”. Manual.

[8] SLOPE INDICATOR COMPANY (2004) – “VW Total Pressure Cell”. Manual.

[9] WATERMARK (2023) – “Soil Moisture Meter. Installation and operating instructions “. Manual.

[10] RIKASENSOR (2015 – “RK510-01. Technical Specifications.”

[11] WORLDSENSING (2021) – “Analog 4-channel Edge Devices - Wireless Data Loggers Ls-G6-Analog-4”. Datasheet.

[12] WORLDSENSING (2023) – “Edge Devices - Wireless Data Loggers Vibrating Wire”. Datasheet.

	**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.
	Gabriel Proença FERREIRA

	Engenheiro Civil formado pela Universidade Federal do Paraná e pós-graduado em Contenção e Fundação pelo IDD. Possui experiência em instalação e automação de instrumentos e, atualmente, desenvolve projetos relacionados à hidrogeração de energia e infraestrutura com foco em interação solo-estrutura.
	**Victor Rafael Galvan LIEVANO** Engenheiro Civil formado pela Universidad Nacional de Colombia; Mestre e Doutor na área de geotecnia pela Universidade de São Paulo (USP). Atualmente desempenha a função de Diretor de Operações da 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.

EXTENSÔMETRO MÚLTIPLO DE HASTES COM ANCORAGEM HIDRÁULICA COMO SUBSTITUIÇÃO AO SISTEMA GRAUTEADO TRADICIONAL EM ESTRUTURA SUBTERRÂNEA DE CASA DE FORÇA

Wilson Soares Jr.
Diretor de Instrumentação e Tecnologia – G5 Engenharia e Gerenciamento Ltda.

Douglas José Penteado Auer
Engenheiro Civil – G5 Engenharia e Gerenciamento Ltda.

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação de extensômetro múltiplo de hastes (EMH) com ancoragem hidráulica expansiva como alternativa ao sistema tradicional grauteado para monitoramento de deformações em estrutura subterrânea de casa de força de usina hidrelétrica. A solução foi adotada em instalação ascendente na abóbada, em condição operacional ativa, na qual o uso de ancoragens grauteadas implicaria riscos executivos, ampliação de prazo e interferências associadas à injeção de calda de cimento sobre estrutura em operação. A utilização de ancoragens hidráulicas expansivas elimina a dependência do grauteamento como mecanismo principal de fixação: a ancoragem ocorre por pressurização controlada, promovendo expansão permanente contra a parede do furo e permitindo fixação imediata, com redução de etapas construtivas, eliminação do tempo de cura e mitigação de riscos. Foram instalados quatro extensômetros múltiplos de hastes — um existente com modernização de sensores de corda vibrante e três novos com ancoragem hidráulica —, totalizando dez canais monitorados e integrados a terminal de leitura centralizado. A obra foi concluída em 28 dias corridos, com execução limpa e sem interrupção das operações da usina.

ABSTRACT

This paper presents the application of a multipoint borehole extensometer (MPBX) with hydraulic expansion anchors as an alternative to the traditional grouted system for deformation monitoring in underground powerhouse structures of a hydroelectric plant. The solution was adopted for an upward installation in the crown arch under active operational conditions, where groutable anchors would entail execution risks, schedule extension, and interference from cement grout injection over an operational structure. Hydraulic expansion anchors eliminate grouting as the primary fixing mechanism: anchoring occurs through controlled pressurization, producing permanent expansion against the borehole wall, allowing immediate fixation, reducing construction steps, eliminating curing time, and mitigating risks. Four

multipoint extensometers were installed — one existing instrument retrofitted with vibrating wire sensors and three new ones with hydraulic anchors — totaling ten monitored channels integrated into a centralized readout terminal. The project was completed in 28 calendar days with clean execution and without interrupting plant operations.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento geotécnico de estruturas subterrâneas de usinas hidrelétricas constitui elemento fundamental da segurança de barragens, abrangendo a avaliação contínua do comportamento do maciço rochoso e das estruturas de concreto ao longo de toda a vida útil do empreendimento. A Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010) e o Plano de Segurança de Barragens (PSB) estabelecem a obrigatoriedade de sistemas de auscultação e instrumentação para grandes barragens, com leituras periódicas e rastreabilidade dos dados [6].

Nesse contexto, o extensômetro múltiplo de hastes - EMH (MPBX – Multipoint Borehole Extensometer) representa um dos instrumentos mais empregados para a medição de deslocamentos diferenciais em maciços rochosos, sendo amplamente utilizado em túneis, cavernas e casas de força subterrâneas [1]. Sua aplicação em casas de força subterrâneas é especialmente relevante em fases de modernização de instrumentação, quando os sensores originais — instalados durante a construção — já apresentam deterioração e precisam ser substituídos sem interrupção das operações.

A técnica convencional de instalação baseia-se no grauteamento do furo após a inserção do conjunto de hastes e ancoragens — procedimento que exige controle rigoroso da injeção, verificação de aderência e período de cura, especialmente crítico em furos ascendentes. Em ambientes subterrâneos em operação, esse processo pode ampliar significativamente o cronograma e impor riscos adicionais à estrutura e aos equipamentos instalados [2].

Este artigo descreve a aplicação de ancoragens hidráulicas expansivas em extensômetros múltiplos instalados na abóbada de uma casa de força subterrânea em operação, como alternativa ao método grauteado. São apresentados o contexto, os desafios da instalação, a descrição dos instrumentos existentes e novos, o processo executivo, o cronograma e a integração dos transdutores de corda vibrante ao sistema de leitura, com análise comparativa das vantagens obtidas.

2. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

A casa de força objeto deste trabalho é uma estrutura subterrânea escavada em maciço rochoso, com abóbada revestida com concreto projetado e tela metálica, contendo unidades geradoras em operação contínua. A caverna apresenta dimensões compatíveis com usinas hidrelétricas de médio porte, com altura interna superior a 30

m e comprimento da ordem de 80 m, conferindo ao ambiente elevada complexidade operacional e restrita acessibilidade à abóbada sem uso de andaimes.

Estruturas subterrâneas escavadas em rocha estão sujeitas a redistribuição de tensões após a escavação, com possível ocorrência de deslocamentos convergentes nas paredes e abóbada ao longo do tempo. Esses movimentos, quando monitorados continuamente, permitem identificar possíveis instabilidades do maciço e avaliar a eficácia dos sistemas de suporte instalados — em especial parafusos de rocha, cabos protendidos e concreto projetado. A ausência de dados confiáveis de deslocamento ao longo do tempo é um risco geotécnico não aceitável em estruturas de geração de energia em operação.

A necessidade de reinstrumentação surgiu da deterioração dos sensores existentes e do interesse em modernizar o sistema de aquisição de dados. Os instrumentos originais, instalados durante a construção da usina, apresentavam corrosão avançada nos elementos de fixação, leitura manual por relógio comparador mecânico e ausência de qualquer capacidade de transmissão remota de dados. A avaliação técnica concluiu que o método grauteado introduziria riscos relevantes: escoamento de calda sobre equipamentos abaixo da abóbada, necessidade de retorno ao andaime após a cura e prolongamento inaceitável do cronograma. A adoção de ancoragens hidráulicas expansivas foi, portanto, avaliada como a alternativa tecnicamente mais adequada ao cenário operacional.

3. FUNDAMENTOS TÉCNICOS

3.1 Extensômetro Múltiplo de Haste (EMH)

O EMH é constituído por um conjunto de ancoragens instaladas em profundidades distintas ao longo de um furo de sondagem, conectadas à cabeça do instrumento por hastes rígidas envoltas em tubos de proteção. O deslocamento de cada ancoragem em relação à cabeça — fixada na boca do furo — corresponde ao deslocamento diferencial acumulado naquele trecho do maciço. Conforme Dunnicliff [1], o sistema permite identificar a localização e magnitude das zonas de deformação ao longo do eixo do furo, sendo particularmente valioso em casas de força onde a redistribuição de tensões pode se manifestar em diferentes profundidades.

As hastes podem ser construídas em aço inoxidável ou fibra de vidro. As hastes em fibra de vidro são preferidas em instalações de longa duração por apresentarem baixo coeficiente de dilatação térmica, elevação desprezível de atrito com o tubo de proteção e imunidade à corrosão — aspectos críticos em ambientes subterrâneos com umidade elevada e agressões químicas [1]. Neste projeto, as hastes dos novos instrumentos são de fibra de vidro, enquanto o instrumento existente modernizado utiliza hastes de aço inox originais, cujo estado foi verificado e considerado adequado para continuidade de operação.

A configuração múltiplo é essencial porque permite distinguir deslocamentos ocorridos em zonas diferentes do maciço. Um único extensômetro com ancoragens a 5 m, 10 m e 15 m fornece três medições independentes: o deslocamento relativo entre a superfície e 5 m (zona de influência imediata da escavação), entre 5 m e 10 m (zona

intermediária) e entre 10 m e 15 m (zona mais profunda, idealmente estável e usada como referência). Esse perfil espacial é fundamental para a avaliação do comportamento da abóbada e para a calibração de modelos geomecânicos.

3.2 Ancoragem Hidráulica Expansiva: Princípio e Aplicação

A ancoragem hidráulica expansiva é composta por uma câmara elástica metálica acoplada à extremidade da haste e conectada a uma linha de pressão hidráulica. Quando pressurizada com fluido por bomba manual, a câmara expande contra as paredes do furo rochoso, gerando fixação mecânica permanente por atrito e embricamento. O bloqueio automático da válvula após a despressurização da linha garante a manutenção da expansão indefinidamente [2]. A Figura 1 mostra em detalhe uma ancoragem hidráulica expansiva antes da inserção no furo, com a câmara de cobre, as conexões de latão e a linha de pressão identificadas.



Figura 1 – Detalhe da ancoragem hidráulica expansiva utilizada nos extensômetros novos: câmara expansível em cobre, conexões de latão para pressurização e linha de fluido hidráulico. A expansão é ativada por bomba manual a aproximadamente 1.500 psi.

Esta tecnologia contrasta com a ancoragem grauteada tradicional, que depende do preenchimento com calda de cimento e do período de cura para atingir a resistência de projeto. Em furos ascendentes, o grout tende a escorrer antes da presa, exigindo técnicas especiais de injeção sob pressão com vedação da boca do furo [3] — impraticáveis sem risco em ambiente operacional com equipamentos imediatamente abaixo do ponto de instalação.

A carga de arrancamento de ancoragens hidráulicas em maciços rochosos competentes é tipicamente comparável à das ancoragens grauteadas. Em testes realizados em granito e basalto, Dunnicliff [1] reporta cargas superiores a 5 kN para

ancoragens hidráulicas expansivas em furos de 38 mm a 75 mm de diâmetro, resultado suficiente para as cargas axiais impostas pelos extensômetros de haste em operação normal. A pressão de operação é o parâmetro de verificação direto: atingida a pressão de projeto (1.500 psi neste caso), a expansão está completa e a ancoragem está em condição operacional.

Tabela 1 – Comparação entre ancoragem grauteada e ancoragem hidráulica expansiva.

Critério	Ancoragem Grauteada	Ancoragem Hidráulica Expansiva
Orientação do furo	Descendente (preferencial); técnica especial para ascendente	Qualquer direção: descendente, horizontal ou ascendente
Mecanismo de fixação	Aderência da calda de cimento à rocha	Expansão mecânica por pressurização (≥ 1.000 psi)
Tempo até fixação	24 a 72 horas (cura do grout)	Imediato após pressurização
Risco em obra	Alto: escoamento de calda sobre equipamentos	Inexistente: sem material cimentício
Etapas de execução	Inserção + injeção de grout + cura + finalização	Inserção + pressurização + finalização
Logística de campo	Bomba de grout, cimento, água, vedações especiais	Bomba hidráulica manual portátil
Interferência operacional	Alta: jornadas prolongadas em andaime	Baixa: concluída no mesmo turno
Rastreabilidade da fixação	Ensaio de aderência (indireto)	Pressão de operação diretamente mensurável
Aplicabilidade em UHE ativa	Limitada	Alta: sem interrupção da usina

3.3 Transdutores de Corda Vibrante (VW)

Os sensores de corda vibrante (VW) representam a tecnologia dominante em monitoramento geotécnico de longa duração. O princípio de funcionamento baseia-se na medição da frequência de vibração de um arame tensionado: a variação dessa frequência, induzida pelo deslocamento da haste do extensômetro, é convertida em unidade de engenharia por meio dos fatores de calibração fornecidos pelo fabricante. O sinal de saída em frequência é imune a ruídos eletromagnéticos e à resistência ôhmica do cabo, permitindo transmissão confiável por vários quilômetros sem degradação do sinal [5] — fundamental em casas de força com fortes campos eletromagnéticos gerados por geradores e transformadores.

Estudos de confiabilidade indicam deriva inferior a 0,025% do fundo de escala por ano, com operação verificada por períodos superiores a 30 anos em estruturas de barragens [4]. Os sensores modelo 4450 (Geokon) possuem termistor integrado para compensação térmica, range de 25 mm, construção em aço inox e vedação interna — adequados para aplicações de longa duração em ambientes subterrâneos com umidade elevada.

3.4 Regulamentação e Boas Práticas Aplicadas

O sistema de instrumentação descrito neste trabalho foi concebido em conformidade com as diretrizes da Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010) e do respectivo Plano de Segurança de Barragens, que exigem a existência de sistema de monitoramento e auscultação com registros rastreáveis e periodicidade definida. A norma ABNT NBR 14271:2023 (Controle Tecnológico de Execução de Barragens) e as recomendações do ICOLD Bulletin 158 [6] (Dam Surveillance – Monitoring Systems and Methods) foram utilizadas como referência para a definição dos pontos de monitoramento, profundidades de ancoragem, periodicidade de leituras e critérios de alerta.

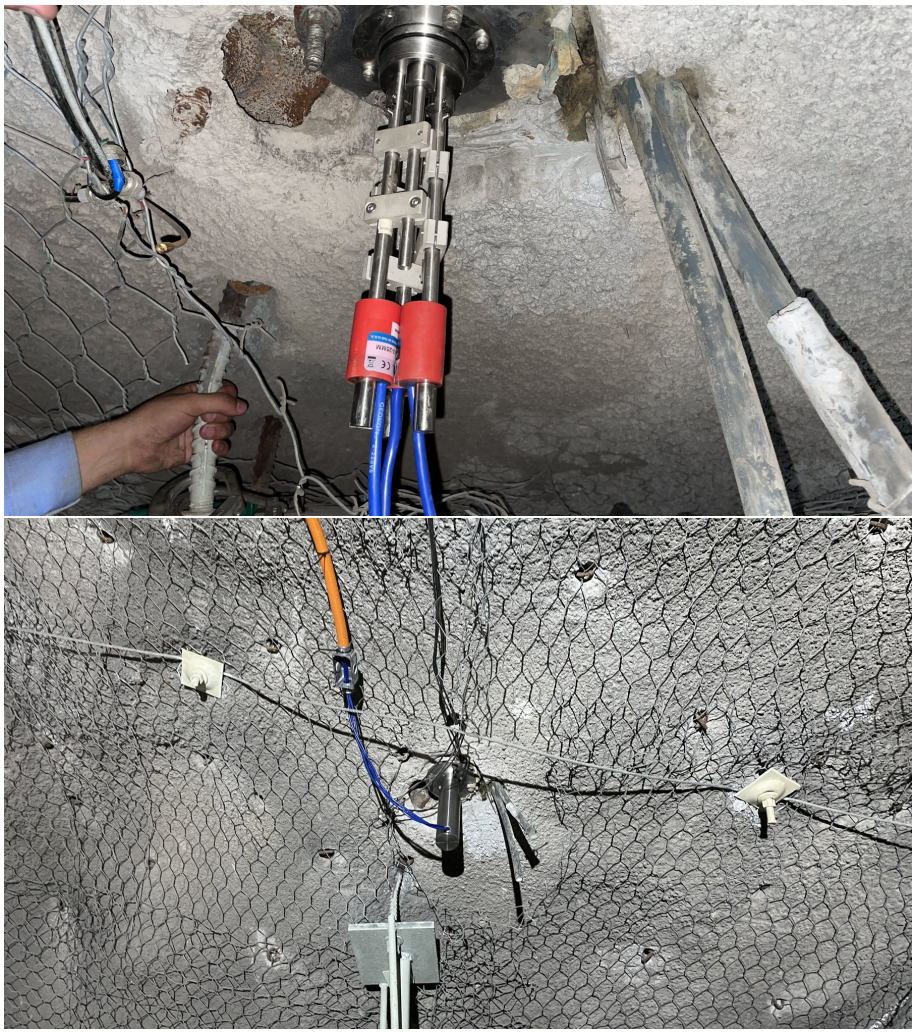
O Bulletin 158 do ICOLD recomenda que sistemas de instrumentação geotécnica em estruturas subterrâneas de usinas hidrelétricas sejam dotados de leituras automáticas sempre que possível, com transmissão remota e registro histórico permanente. O terminal 4999-16VTS adotado neste projeto é compatível com dataloggers da série CR (Campbell Scientific) e da linha DT80 (DataTaker), permitindo a futura implantação de Sistema de Aquisição Automática de Dados (SAAD) sem necessidade de alteração dos sensores ou cabeamentos instalados.

4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

4.1 Extensômetros Existentes — Critérios de Avaliação e Modernização

Antes de definir o escopo da modernização, foi realizada inspeção detalhada dos extensômetros existentes, avaliando: (i) condição estrutural das hastes, tubos de proteção e cabeça de alumínio; (ii) liberdade de movimento de cada haste em relação à ancoragem, verificada por aplicação de carga axial controlada e observação de resposta; (iii) integridade das ancoragens, avaliada indiretamente pela tensão de resistência à extração; e (iv) compatibilidade da geometria da cabeça com a instalação dos novos transdutores VW.

Um dos extensômetros de haste originais da fase de construção encontrava-se em condições que permitiram o aproveitamento da estrutura de hastes após limpeza e verificação de liberdade de movimento. Este instrumento possui três hastes instaladas nas profundidades de 5 m, 10 m e 15 m, cobrindo uma zona de investigação de 15 m a partir da superfície da abóbada. A modernização consistiu na substituição dos medidores mecânicos originais por sensores de corda vibrante modelo 4450 (Geokon), adaptando as conexões da cabeça de alumínio para receber os transdutores elétricos com cabos de transmissão. As Figuras 2 e 3 documentam o instrumento após a modernização.



Figuras 2 e 3 – Extensômetro existente após modernização com sensores de corda vibrante Geokon modelo 4450. Esquerda: cabeça do instrumento com sensor VW e cabo de leitura na abóbada. Direita: detalhe da haste em aço inox e sensor com etiqueta de identificação.

4.2 Novos Extensômetros — Ancoragem Hidráulica Expansiva

Foram instalados três novos extensômetros de haste em furos de 75 mm de diâmetro perfurados ascendentemente na abóbada, com o modelo 1100 Geokon. Cada instrumento é composto por ancoragens hidráulicas expansivas, hastes em fibra de vidro envoltas em tubos de proteção plástico e sensor de deslocamento de corda vibrante modelo 4450 na cabeça.

Dois dos novos instrumentos possuem duas hastes cada, com ancoragens a 5 m e 10 m de profundidade. O terceiro instrumento possui três hastes, com ancoragens a 5 m, 10 m e 15 m. Dessa forma, o sistema instalado totaliza dez sensores de corda vibrante: três no instrumento existente (profundidades 5 m, 10 m e 15 m) e sete nos três novos instrumentos, cobrindo as mesmas faixas de profundidade. A distribuição dos pontos de ancoragem possibilita a identificação de zonas de deformação diferencial tanto na região próxima à escavação (primeiros 5 m) quanto em zonas mais profundas do maciço (até 15 m), fornecendo um perfil espacial adequado à avaliação do comportamento da abóbada.

As Figuras 4 e 5 documentam os novos extensômetros instalados na abóbada após o comissionamento. A Figura 4 mostra em detalhe a cabeça do instrumento com os sensores VW montados — identificados pelas faixas vermelhas características do modelo 4450 —, a carcaça de aço inox, os cabos azuis de transmissão e a placa base fixada à rocha. A Figura 5 apresenta a vista geral de um ponto instrumentado na abóbada, com os cabos direcionados ao terminal de leitura.



Figuras 4 e 5 – Novos extensômetros com ancoragem hidráulica expansiva instalados na abóbada. Esquerda: detalhe da cabeça em aço inox com sensores VW modelo 4450 (faixas vermelhas) e cabos de transmissão. Direita: vista geral do ponto instrumentado na abóbada.

4.3 Terminal de Leitura Centralizado e Arquitetura do Sistema

Os cabos de todos os sensores foram direcionados ao longo da superfície da abóbada e das paredes da caverna até um terminal de leitura centralizado modelo 4999-16VTS (Geokon), com capacidade para 16 canais de sensores VW com termistores. O terminal foi instalado em local de fácil acesso no piso da casa de força, protegido em caixa estanque com grau de proteção IP65, adequada ao ambiente subterrâneo com elevada umidade relativa.

A arquitetura do sistema permite três modos de operação: (i) leitura manual com unidade portátil GK-404, com identificação de canal por chave rotativa; (ii) conexão de datalogger externo via cabo voador nos bornes frontais; e (iii) futura integração ao SAAD da usina por meio de cabo múltiplo permanente. Essa arquitetura escalável protege o investimento realizado: a expansão para leitura automática não exige nenhuma alteração nos sensores, cabeaçóes ou terminal já instalados.

5. PROCESSO EXECUTIVO E CRONOGRAMA

5.1 Etapas de Instalação

A Figura 6 documenta a preparação do conjunto de hastes do extensômetro — enrolado em espiral para transporte no andaime — imediatamente antes da inserção no furo ascendente na abóbada. O conjunto inclui as hastes de fibra de vidro, tubos de proteção e as linhas hidráulicas que ativam as ancoragens após o posicionamento.



Figura 6 – Técnico em andaime com o conjunto de hastes do extensômetro enrolado em espiral, pronto para desdobramento e inserção no furo ascendente. O conjunto inclui hastes de fibra de vidro, tubos de proteção e linhas hidráulicas das ancoragens.

1. Mobilização e site survey: reconhecimento das condições dos instrumentos existentes, inspeção das hastes e avaliação de reaproveitamento;
2. Modernização do extensômetro existente: limpeza da cabeça, verificação de liberdade de movimentação das hastes, instalação dos sensores VW 4450 e conexão dos cabos;

3. Preparação dos conjuntos novos: enrolamento das hastes em espiral, marcação das profundidades de ancoragem e verificação das linhas hidráulicas;
4. Inserção no furo ascendente: desdobramento cuidadoso do conjunto próximo ao furo e inserção progressiva até a profundidade predeterminada de cada ancoragem;
5. Pressurização das ancoragens: conexão sequencial de cada linha hidráulica à bomba manual e pressurização a 1.500 psi, com bloqueio automático da válvula;
6. Finalização mecânica: corte das linhas hidráulicas externas, instalação da cabeça de alumínio e montagem dos sensores VW nas conexões swagelok;
7. Direcionamento de cabos: encaminhamento ao longo da abóbada e paredes até o terminal 4999-16VTS, com fixação por abraçadeiras e anilhas numeradas;
8. Comissionamento: leitura individual de todos os canais com GK-404, registro das leituras zero, preenchimento das fichas de instalação e elaboração do relatório técnico.

5.2 Cronograma e Eficiência Executiva

A obra foi executada integralmente em 28 dias corridos, abrangendo o período de 26 de fevereiro a 26 de março de 2024. Para uma obra de instrumentação geotécnica em ambiente subterrâneo operacional — envolvendo quatro extensômetros múltiplos, dez sensores de corda vibrante, cabeamentos e terminal de leitura centralizado — esse prazo é notavelmente reduzido e só foi possível graças à adoção da ancoragem hidráulica expansiva.

A mobilização e o reconhecimento de campo foram realizados em um único dia (26/02/2024), com levantamento das condições dos instrumentos existentes, verificação dos furos e planejamento do sequenciamento dos serviços. Em seguida, ao longo de oito dias (01 a 12/03/2024), foi executada a modernização do extensômetro existente: limpeza da cabeça, verificação de liberdade das hastes, instalação dos sensores VW modelo 4450 e conexão dos cabos. A etapa mais crítica — a instalação dos três novos EMH com ancoragem hidráulica expansiva nos furos ascendentes da abóbada — foi concluída em oito dias (13 a 22/03/2024), com cada instrumento completamente instalado, pressurizado e comissionado em jornada única de trabalho em andaime, sem retorno necessário para verificação pós-cura. A instalação do terminal 4999-16VTS e o direcionamento de todos os cabos foram realizados em dois dias (22 a 23/03/2024). Por fim, três dias foram destinados ao comissionamento completo (24 a 26/03/2024): leitura individual de cada canal, registro das leituras zero, fichas de instalação e relatório técnico final.

Com o método grauteado convencional, estima-se que somente o processo de cura e verificação das ancoragens nos três furos ascendentes acrescentaria entre 15 e 20 dias ao cronograma, tornando a escolha da ancoragem hidráulica decisiva para o cumprimento do prazo contratual.

Outro aspecto que merece destaque é a limpeza da execução. Em nenhum momento houve risco de contaminação da área por materiais cimentícios, respingos de calda

ou resíduos de injeção. Os equipamentos geradores, transformadores e sistemas de controle imediatamente abaixo do andaime permaneceram protegidos apenas pela lona preventiva, sem necessidade de blindagens adicionais. O serviço foi executado com interferência mínima sobre as atividades operacionais da usina, sem geração de resíduos sólidos ou líquidos relacionados à instrumentação. A ausência de tempo de espera entre etapas permitiu que a equipe de campo mantivesse ritmo contínuo de trabalho, otimizando o uso das janelas de acesso ao andaime e reduzindo ao mínimo a exposição de profissionais ao ambiente de risco.

6. VANTAGENS DA SOLUÇÃO COM ANCORAGEM HIDRÁULICA

A substituição das ancoragens grauteadas pelas hidráulicas expansivas no contexto de instalação ascendente em estrutura operacional revelou um conjunto expressivo de vantagens técnicas, operacionais e de segurança, sintetizadas a seguir.

6.1 Eliminação do Risco de Escorrimento de Calda

O principal desafio do grauteamento ascendente é a tendência de a calda escorrer para a boca do furo antes da presa. Em casas de força, essa região é ocupada por equipamentos eletromecânicos de alto valor em operação. O próprio fabricante Geokon reconhece que furos ascendentes exigem técnicas especiais de grauteamento [3]. Com ancoragens hidráulicas, esse risco é completamente eliminado pela ausência de qualquer material fluido durante a operação de fixação. Além disso, não há necessidade de instalação de bandejas de contensão, protetores de equipamentos ou equipes de vigilância preventiva durante a operação de fixação.

6.2 Redução do Tempo de Ocupação do Andaime

Toda a sequência — inserção, pressurização, finalização mecânica e sensor VW — é concluída em um único turno de trabalho, sem retorno obrigatório no dia seguinte. Isso reduz significativamente a exposição da equipe em ambiente subterrâneo operacional com riscos associados ao trabalho em altura. Para três instrumentos, a economia foi de aproximadamente seis dias-andaime, o que equivale a uma redução da ordem de 60% no tempo de ocupação do andaime em relação ao método grauteado.

6.3 Simplificação Logística

O método grauteado exige transporte e armazenamento de cimento, água e equipamentos de injeção, com descarte de resíduos em ambiente subterrâneo restrito. A ancoragem hidráulica requer apenas uma bomba manual portátil e o fluido selado na tubulação do instrumento, sem geração de resíduos e sem descarte. A redução de carga logística é especialmente relevante em casas de força subterrâneas, onde o acesso é restrito, os elevadores de carga possuem capacidade limitada e a manipulação de materiais cimentícios em ambiente confinado exige controles de higiene ocupacional adicionais.

6.4 Rastreabilidade Direta da Fixação

A pressão de pressurização (1.500 psi) é um parâmetro diretamente mensurável e registrado nas fichas de instalação, diferentemente da ancoragem grauteada, cuja qualidade é inferida indiretamente por testes de arrancamento realizados após a cura. Esse registro confere rastreabilidade que facilita auditorias técnicas, laudos de segurança e eventuais revisões do programa de instrumentação ao longo da vida útil da estrutura. Em inspeções futuras, o histórico de pressão de instalação permite também avaliar a eventual necessidade de repressurização caso as leituras indiquem perda de contato da ancoragem com a rocha.

6.5 Viabilidade Operacional sem Interrupção

A fixação imediata, sem dependência de cura, viabilizou a execução integral do projeto sem interrupção das operações de geração. Em projetos de modernização de instrumentação em UHEs — onde paradas programadas são de curta duração e elevado custo, e as janelas de acesso ao andaime são restritas e negociadas com as equipes de operação e manutenção — essa característica é determinante para a viabilização do escopo no prazo contratual. A ausência de dependência de cura também elimina a necessidade de gestão de temperatura e umidade do ambiente durante o período de endurecimento, que seria um fator adicional de risco em espaços confinados com ventilação mecânica controlada.

7. SENSORES DE CORDA VIBRANTE E AQUISIÇÃO DE DADOS

A tecnologia VW é a mais adequada para monitoramento geotécnico de longa duração em estruturas hidrelétricas. Seu sinal em frequência independe da resistência do cabo e não é afetado por umidade nas conexões, operando confiavelmente por décadas em ambientes agressivos [4, 5]. Os sensores modelo 4450 possuem termistor integrado para compensação térmica — fundamental em ambientes subterrâneos com variações sazonais de temperatura que podem introduzir erros sistemáticos nas leituras caso não sejam corretamente tratadas.

O terminal 4999-16VTS centraliza os dez canais instalados e é compatível com dataloggers comerciais para futura automação (SAAD) com transmissão remota e alertas em tempo real [1, 6], alinhando o sistema às boas práticas do ICOLD e aos requisitos do Plano de Segurança de Barragens. A Figura 7 documenta o comissionamento do sistema com a unidade GK-404 conectada ao terminal na parede da casa de força.

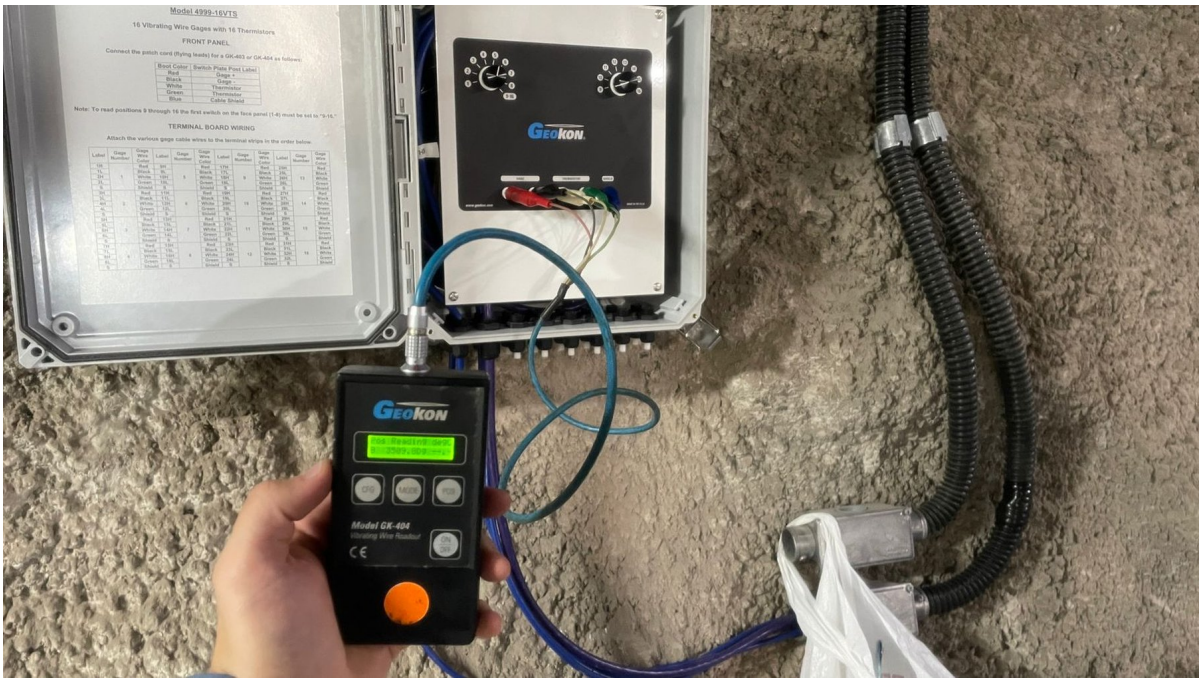


Figura 7 – Comissionamento do sistema: terminal 4999-16VTS instalado com unidade portátil GK-404 conectada, exibindo leitura de frequência durante a verificação dos canais e o registro das leituras zero.

As fichas de instalação preenchidas para cada sensor incluem: número de série do transdutor, modelo, range nominal, fator de calibração G fornecido pelo fabricante, canal do terminal, profundidade de ancoragem correspondente, pressão de pressurização (para os instrumentos novos) e leitura zero em dígitos (Dg) com temperatura registrada no momento da leitura. Esses documentos constituem a linha de base metrológica do sistema, indispensável para a interpretação correta das leituras ao longo da vida útil da instrumentação.

A frequência mínima de leituras recomendada pelo ICOLD Bulletin 158 para instrumentação geotécnica em estruturas de usinas em operação é mensal para leituras de rotina, com aumento para semanal ou diária em períodos de variação hidrológica significativa ou após eventos sísmicos [6]. O sistema implantado é compatível com qualquer uma dessas periodicidades, com a vantagem de que a leitura de dez canais com a unidade manual GK-404 requer menos de 15 minutos por campanha, sem necessidade de acesso ao andaime.

8. CONSIDERAÇÕES SOBRE CONFIABILIDADE

8.1 Ancoragens Hidráulicas

Em rochas competentes, a expansão sob pressão controlada promove contato uniforme e permanente com a parede do furo. Neste projeto, todas as ancoragens atingiram 1.500 psi sem indicação de deterioração do furo, com valores registrados nas fichas de instalação. A estabilidade do contato ancoragem-rocha está associada à pressão de confinamento exercida pela expansão, que permanece ativa

indefinidamente pelo bloqueio da válvula. Segundo Geokon [2], em rochas com resistência à compressão uniaxial superior a 20 MPa, a ancoragem hidráulica é equivalente em desempenho à ancoragem grauteada, com a vantagem adicional da verificação direta por pressão.

8.2 Sensores VW

Quanto aos sensores VW, a literatura registra operação bem-sucedida por períodos superiores a 30 anos em estruturas de barragens [4], com deriva inferior a 0,025% do fundo de escala por ano. Após a conclusão, as leituras zero foram documentadas em fichas individuais contendo: número de série, modelo, range, fator de calibração (G), profundidade da ancoragem e leitura zero — garantindo rastreabilidade metrológica ao longo de toda a vida útil.

A compensação térmica é realizada pelo termistor integrado ao sensor 4450, que fornece a temperatura atual no momento de cada leitura. O deslocamento corrigido é calculado pela expressão clássica: $D = G \times (R_1 - R_0) + K \times (T_1 - T_0)$, onde G é o fator de calibração, R são as leituras em dígitos, K é o coeficiente térmico do sensor e T são as temperaturas em graus Celsius [1]. Essa correção é especialmente importante em instalações com hastes de aço inox, que apresentam coeficiente de dilatação de 11×10^{-6} /°C, podendo introduzir erros da ordem de 0,11 mm por grau Celsius em hastes de 10 m de comprimento.

9. CONCLUSÕES

A aplicação do EMH com ancoragem hidráulica expansiva em furos ascendentes na abóbada de uma casa de força subterrânea em operação demonstrou ser superior à abordagem grauteada convencional nas condições descritas. A execução de quatro extensômetros múltiplos de hastes com dez sensores de corda vibrante — incluindo a modernização de um instrumento existente e a instalação de três novos instrumentos com ancoragem hidráulica — foi concluída em 28 dias corridos sem interrupção das operações e sem qualquer incômodo ou contaminação do ambiente.

Os principais benefícios verificados foram: eliminação completa do risco de contaminação por calda; redução de aproximadamente 60% no tempo de andaime em relação ao método grauteado; simplificação logística sem geração de resíduos; fixação imediata com rastreabilidade direta pela pressão de operação registrada; e execução limpa e organizada em jornada única por instrumento, sem retorno para verificação pós-cura.

A integração dos dez sensores VW ao terminal centralizado 4999-16VTS proporciona uma plataforma de monitoramento robusta, com alta confiabilidade de longo prazo, rastreabilidade metrológica documentada e capacidade de evolução para aquisição automatizada sem alteração da infraestrutura instalada. O sistema está em conformidade com os requisitos da legislação de segurança de barragens e com as recomendações do ICOLD Bulletin 158.

A técnica com ancoragem hidráulica deve ser considerada solução preferencial sempre que se combinem furos ascendentes, ambientes operacionais com restrições de prazo, necessidade de preservação do ambiente e mitigação de riscos executivos em empreendimentos hidrelétricos. A experiência relatada neste trabalho contribui para a consolidação dessa prática na instrumentação geotécnica de estruturas subterrâneas e poderá servir de referência para empreendimentos similares.

10. PALAVRAS-CHAVE

Instrumentação geotécnica; extensômetro múltiplo de hastes; ancoragem hidráulica expansiva; monitoramento de deformações; estrutura subterrânea; instalação ascendente; sensor de corda vibrante; modernização; segurança de barragens; casa de força.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] DUNNICLIFF, J. (1988) – Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. John Wiley & Sons, Nova York, EUA, 577 p.

[2] GEOKON, Inc. (2024) – Anchors: Groutable, Hydraulic, Borros, Snap-Ring. Tech Tips MPBX Design. Disponível em: https://www.geokon.com/Anchors. Acesso em: mar. 2025.

[3] GEOKON, Inc. (2024) – Instruction Manual: Model 1280 A-6 Borehole Extensometer. Lebanon, NH, EUA. Disponível em: https://www.geokon.com/content/manuals/1280_Borehole_Exto_Model_A6.pdf. Acesso em: mar. 2025.

[4] PENMAN, A.D.M.; CHARLES, J.A. (1985) – Some Facts About Long-Term Reliability of Vibrating Wire Instruments. Transportation Research Record nº 1004, National Academies Press, Washington, D.C., EUA, pp. 31–37.

[5] GEOSENSE (2024) – Why Are Vibrating Wire Sensors Used in Structural and Geotechnical Monitoring? Disponível em: https://www.geosense.com/tech-notes/. Acesso em: mar. 2025.

[6] ICOLD (2018) – Dam Surveillance – Monitoring Systems and Methods. Bulletin 158, International Commission on Large Dams, Paris, França.

[7] BRASIL (2010) – Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 – Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

12. CURRÍCULO DOS AUTORES



Wilson Soares Jr

Diretor de Instrumentação e Tecnologia – G5 Engenharia e Gerenciamento Ltda.

Engenheiro Civil pela UFPR, especialista em instrumentação e monitoramento e automação de estruturas geotécnicas com 25 anos de experiência, em projetos de infraestrutura, hidro geração e mineração.



Douglas José Penteado Auer

Engenheiro Civil – G5 Engenharia e Gerenciamento Ltda.

Engenheiro Civil com atuação em instrumentação geotécnica e instalação de sistemas de monitoramento. Responsável pela execução dos serviços de campo descritos neste artigo, incluindo instalação, comissionamento e elaboração do relatório técnico.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.1, IN.2, IN.3, IN.4
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

RESTABELECIMENTO DAS MEDIÇÕES DAS SUBPRESSÕES NA CASA DE FORÇA E TOMADA D'ÁGUA DA USINA APOLÔNIO SALES (MOXOTÓ)

Luiz SIEBER
Engenheiro Civil – AXIA Energia Nordeste

Willamy FERREIRA
Engenheiro Civil - AXIA Energia Nordeste

RESUMO

Este trabalho trata do restabelecimento das medições de subpressão na fundação da casa de força da Usina Apolônio Sales, no contexto das ações de monitoramento estrutural por meio de piezometria. O estudo destaca a importância do acompanhamento geotécnico para avaliar o comportamento da estrutura e descreve a instalação de novos piezômetros na casa de força em substituição ao sistema original de instrumentação danificado. As leituras iniciais dos 12 piezômetros instalados nos quatro blocos da casa de força foram comparadas aos registros históricos do início da década de 1980, evidenciando comportamento semelhante das subpressões na fundação. Os resultados indicam que não houve alterações significativas no regime de pressões atuantes, contribuindo para a avaliação da estabilidade estrutural e para o aperfeiçoamento das ações de segurança, operação e manutenção do empreendimento.

ABSTRACT

This work deals with the reestablishment of the subpressure measurements in the foundation of the powerhouse of the Apolônio Sales Power Plant, in the context of structural monitoring actions by means of piezometry. The study highlights the importance of geotechnical monitoring to assess the behavior of the structure and describes the installation of new piezometers in the powerhouse to replace the original damaged instrumentation system. The initial readings of the 12 piezometers installed in the four blocks of the powerhouse were compared to historical records from the early 1980s, showing similar behavior of the underpressures in the foundation. The results indicate that there were no significant changes in the regime of pressures acting, contributing to the evaluation of structural stability and to the improvement of safety, operation and maintenance actions of the project.

Classificação: Setorial

1. INTRODUÇÃO

A usina hidrelétrica Usina Apolônio Sales localiza-se no trecho do submédio do rio São Francisco, a 31 km da UHE Luiz Gonzaga (Itaparica) sentido jusante. A jusante da usina está o reservatório Delmiro Gouveia, de modo que a águas turbinadas em suas máquinas, acionam também as turbinas das usinas de Paulo Afonso I, II e III. Através de um canal escavado a partir de sua margem direita a montante, o reservatório de Moxotó fornece água necessária para o acionamento das turbinas da usina Paulo Afonso IV.

A Casa de Força é equipada com quatro unidades geradoras de potência unitária 100 MW, totalizando uma potência instalada de 400 MW. As turbinas são do tipo Kaplan de eixo vertical, com engolimento máximo da ordem de 550 m^3/s.

Os diques são constituídos de um maciço de enrocamento com núcleo argiloso. O coroamento na cota 254,25m é provido de uma estrada com leito em concreto. O maior trecho do enrocamento, entre a Ilha da Tapera e a usina tem o núcleo argiloso com eixo vertical.

Os trechos adjacentes à Barragem Móvel e o trecho na margem esquerda da Usina, foram constituídos com o núcleo argiloso com eixo inclinado de modo que o mesmo se apoiasse sobre a parte mais sã da rocha da fundação.



Figura 1 - Usina Apolônio Sales

Nas Figura 1 e 3 são apresentadas a planta baixa da usina e um corte típico da estrutura de concreto da casa de força.

Classificação: Setorial

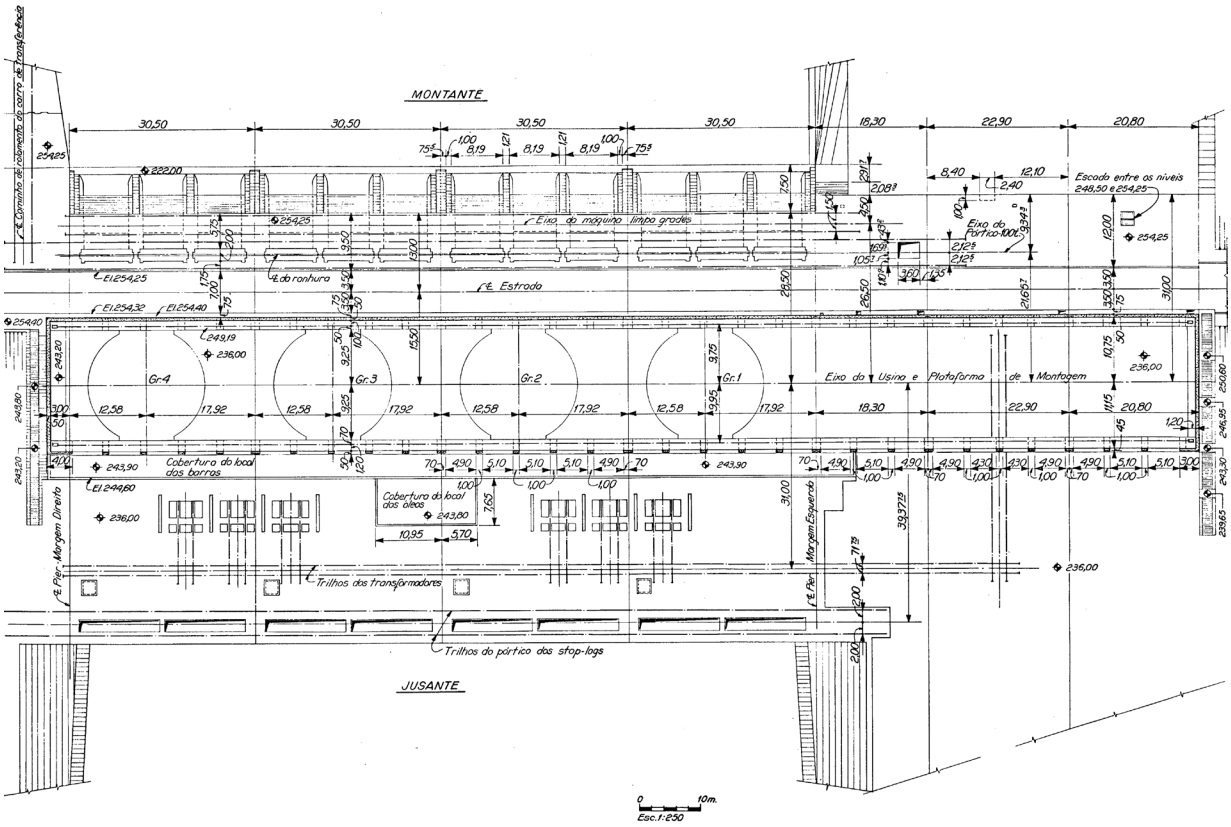


Figura 2 - Vista em planta da Usina Apolônio Sales

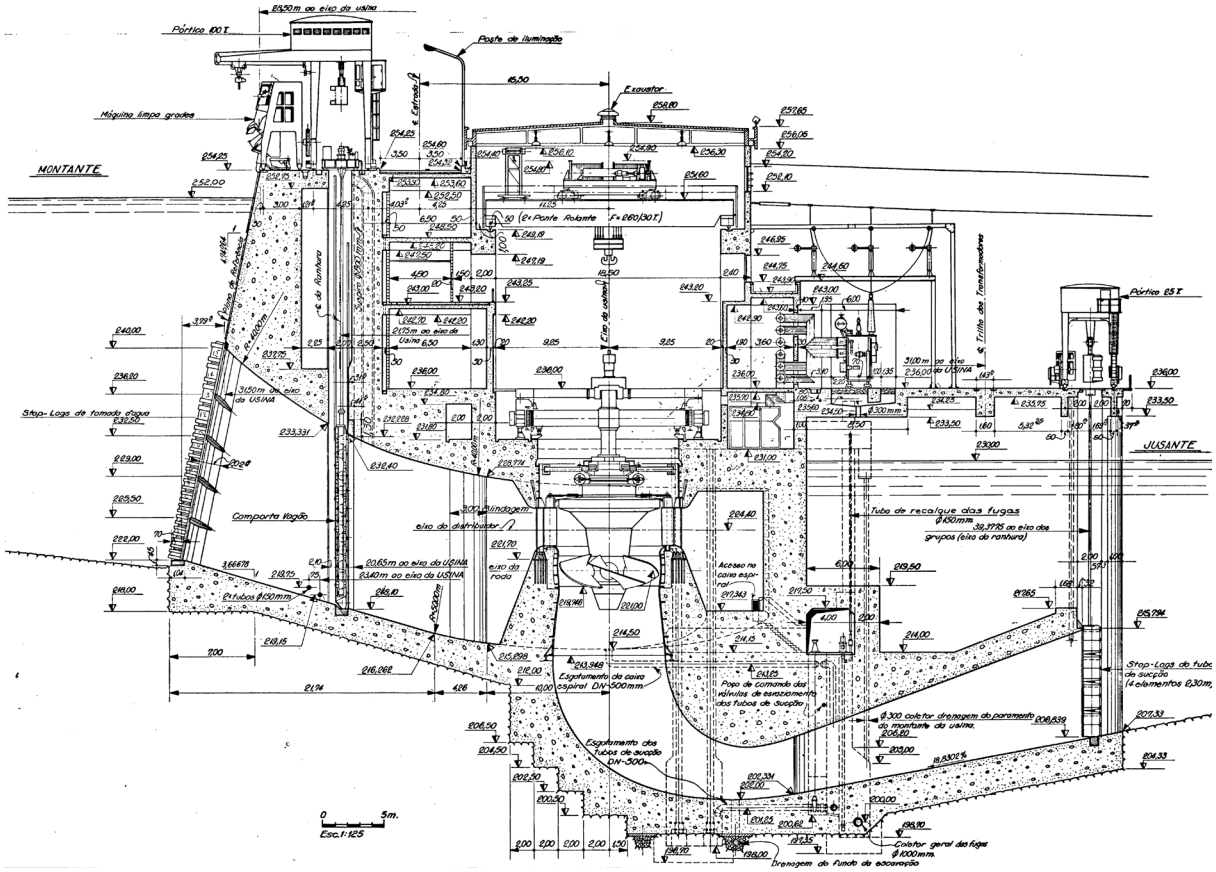


Figura 3 - Corte típico da casa de força.

Classificação: Setorial

2. SISTEMA DE DRENAGEM DA FUNDAÇÃO

O maciço rochoso de fundação da usina Apolônio Sales é constituído por rochas granito-gnaissicas com ocorrências de granodioritos, quartzo-dioritos, anfibolitos e milonitos.

O sistema de drenagem da fundação é constituído por drenos verticais implantados mais a montante, seguido por um sistema de valetas de drenagem ao longo do contato concreto-rocha. A valeta principal de drenagem, conforme mostrado na Figura 4, possui seção transversal de 1,2 x 1,0 m, com uma tubulação de concreto com Ø600 mm no seu interior envolvida por brita.

O projeto demonstra um sistema de drenagem robusto com baixa probabilidade de colmatação.

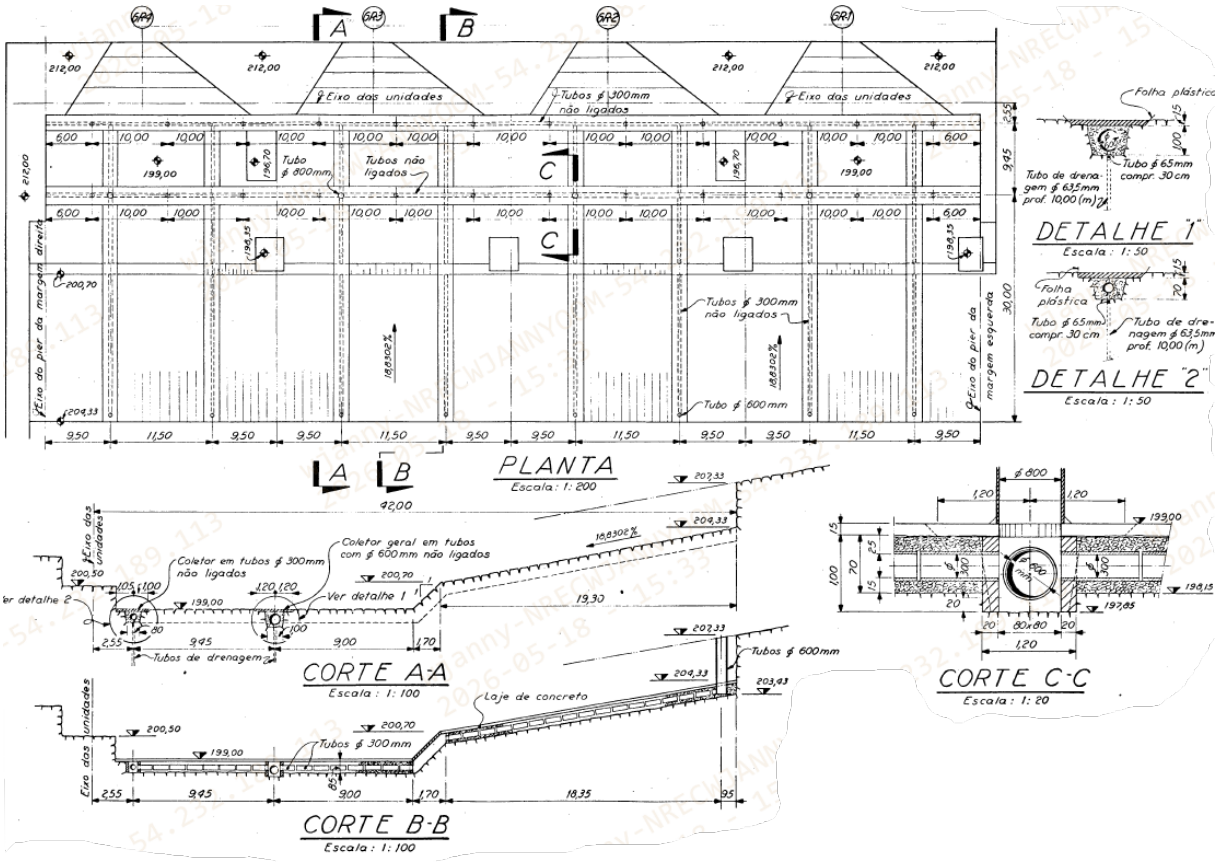


Figura 4 - Planta baixa do sistema de drenagem da casa de força

Classificação: Setorial

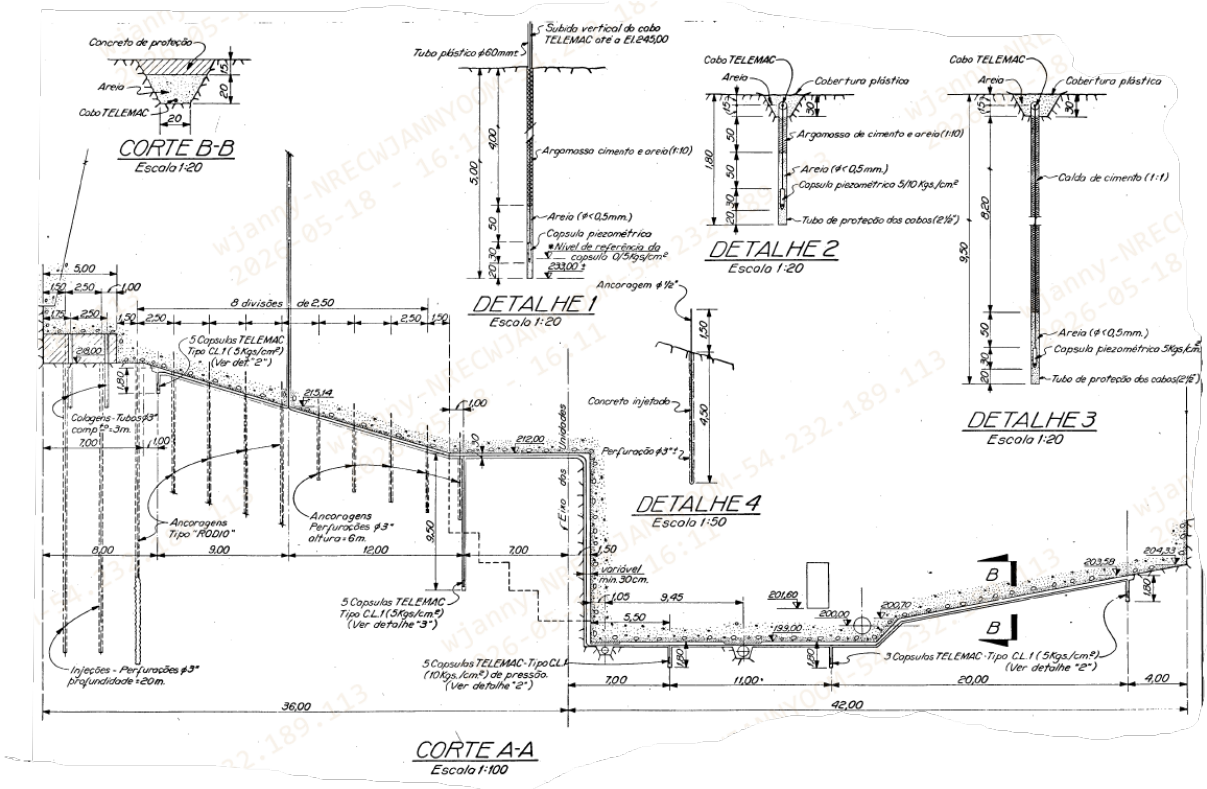


Figura 5 - Detalhes do sistema de drenagem interno da usina e piezômetros tipo Telemac

Como o sistema é fechado, sem acesso para inspeção ou limpeza, tornou-se importante reavaliar os valores das subpressões para verificar sua eficiência, após um longo período de operação da usina.

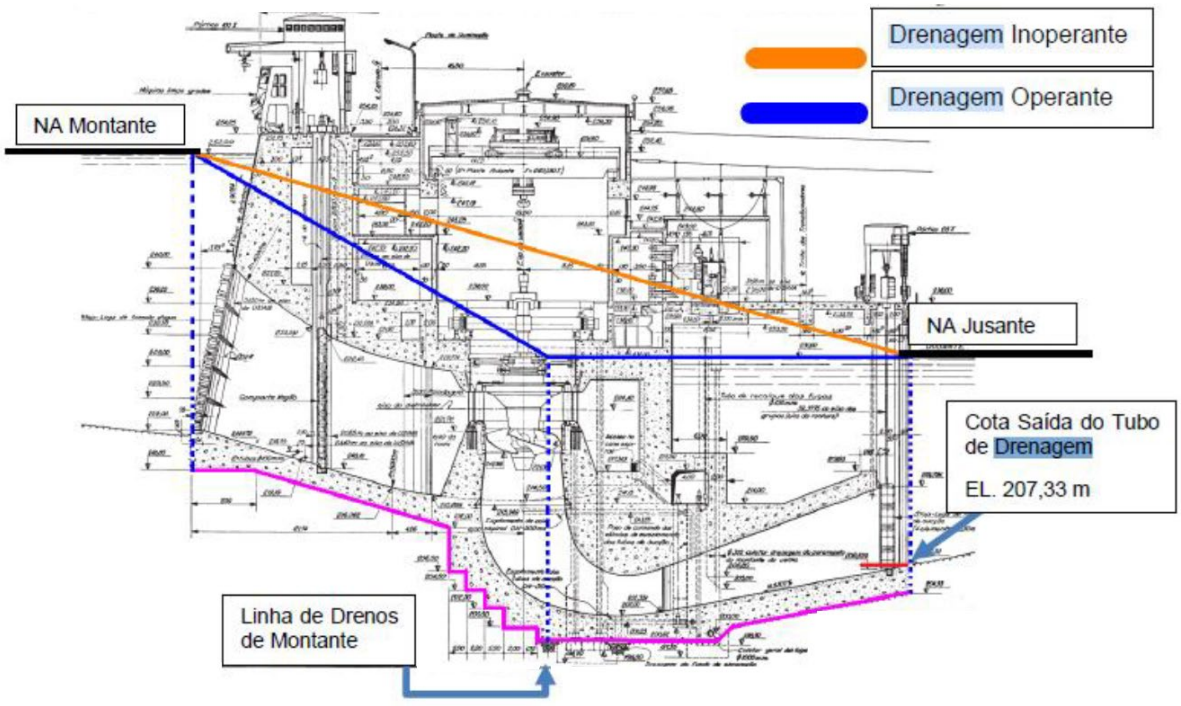


Figura 6 – Esquema de subpressões com e sem o sistema de drenagem

Classificação: Setorial

3. PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

Ao longo de sua operação, a usina passou por processos de reinstrumentação com o objetivo principal de monitorar os efeitos da RAA (Reatividade Álcali-Agregado). Antes da instalação dos novos piezômetros, o plano de monitoramento era composto pelos instrumentos listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Plano de instrumentação antes da instalação dos novos instrumentos

Instrumentos	Total de instrumentos
Pêndulo Direto	6
Pêndulo Indireto	4
Extensômetros Múltiplo de Hastes	7
Extensômetros Horizontais de Fio	8
Extensômetros Verticais de Fio	7
Medidores Triortogonais	31
Base de Alongâmetro	13
Marcos Superficiais	65
Piezômetro Tubo Aberto	20
Medidor de Vazão	1
TOTAL	162

4. NOVOS PIEZÔMETROS NA CASA DE FORÇA

Originalmente foram instalados na fundação da casa de força da usina Apolônio Sales, um conjunto de 18 piezômetros elétricos tipo *Telemac* para observação da subpressões na fundação, conforme Figura 7.

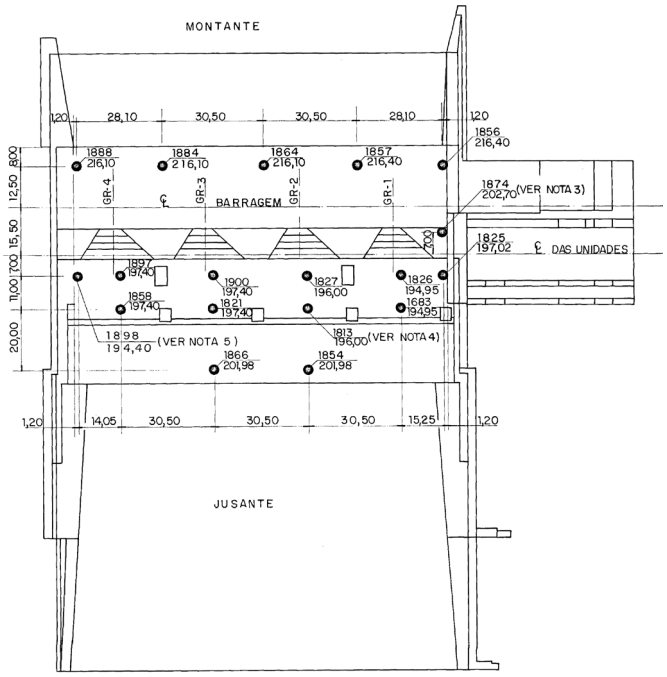


Figura 7 - Localização dos piezômetros originalmente instalados

Classificação: Setorial

De acordo com as medições registradas anteriormente pelos piezômetros, os níveis de subpressão que atuavam na fundação da casa de força estavam próximos a linha de carga considerada no projeto com os drenos de fundação operantes, conforme Figura 8.

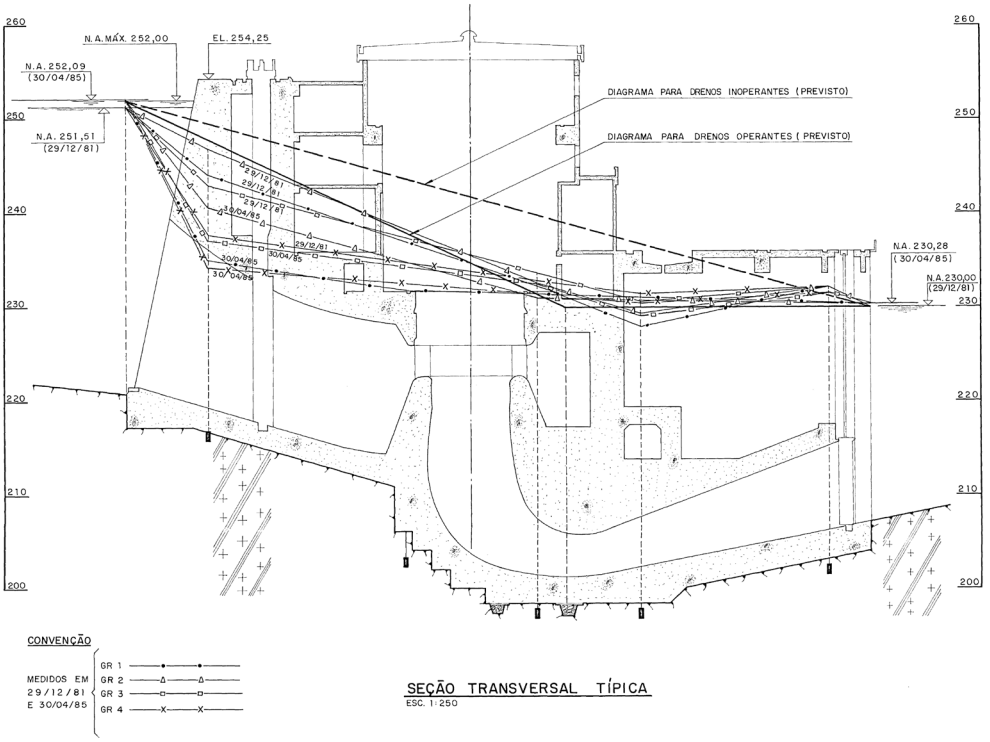


Figura 8 – Linha de carga dos piezômetros instalados na construção

Com o tempo, esses instrumentos deixaram de fornecer leituras e, posteriormente, todo o sistema foi desativado.

Por não se ter acesso a esses drenos para avaliação do seu funcionamento foi solicitado, por consultoria externa, a instalação de piezômetros a fim de se verificar quais os níveis de subpressão que estão atuando nas fundações dos blocos da casa de força.

A implantação desses instrumentos foi planejada para estabelecer uma linha de piezômetros de tubo ao longo das seções de cada um dos quatro blocos da usina, conforme indicado na Figura 9.

Classificação: Setorial

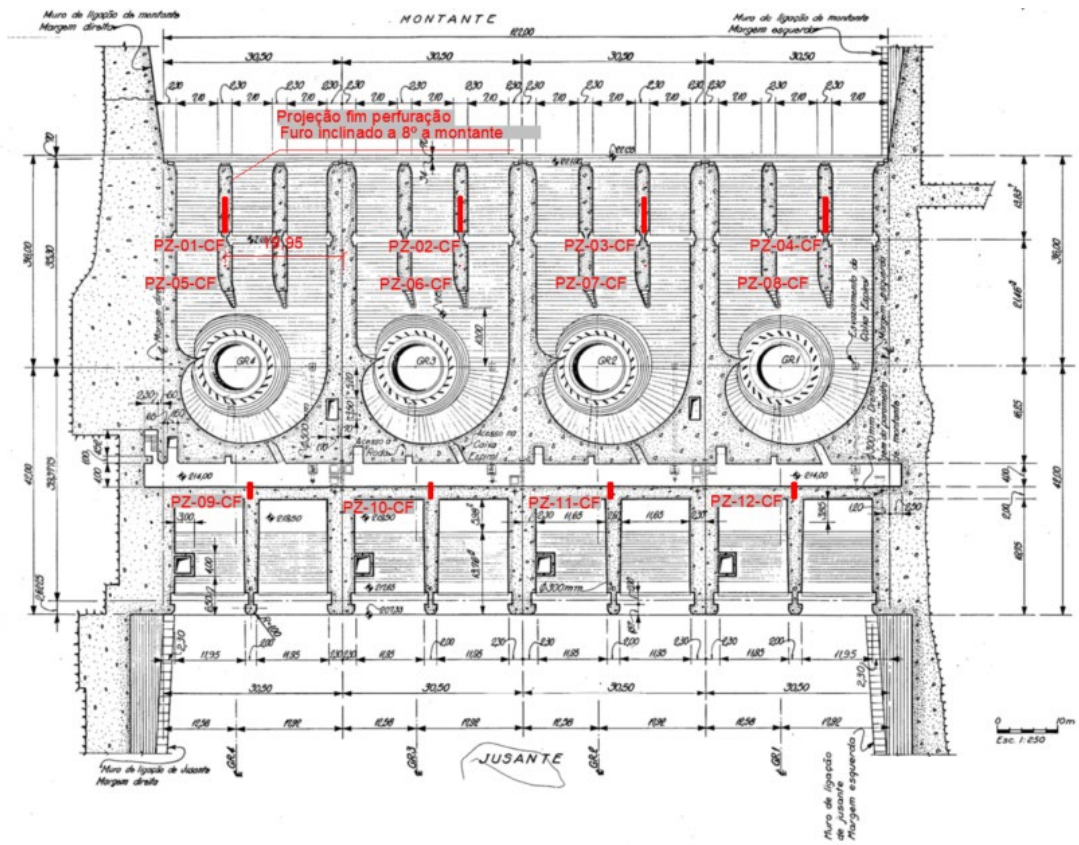


Figura 9 - Localização dos novos piezômetros nas estruturas da usina

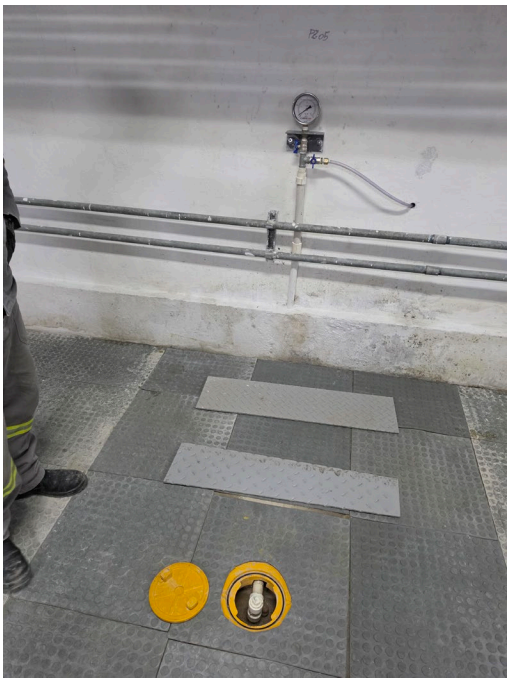


Figura 10 - Piezômetro instalado na Sala dos Painéis no Piso do Gerador



Figura 11 - Piezômetro instalado na Crista (Tomada d'água)

Classificação: Setorial

5. DESAFIOS DO PROJETO

Durante a execução do projeto alguns desafios tiveram que ser superados para a adequada conclusão dos trabalhos:

a) Escolha de uma empresa que tivesse experiência comprovada na execução dos serviços;
b) Dificuldade em locar os furos dentro dos pisos/galerias devido a impossibilidade de identificar visualmente as estruturas dos pilares no interior, etapa que teve que ser conferida e compatibilizada aos projetos (“como construído”). Qualquer erro na locação dos piezômetros podia incorrer de o seu furo acessar caixa espiral ou tubo de sucção de determinada da unidade geradora. Esse tipo de evento poderia causar inundação do ambiente devido a elevada pressão;
c) Devido à esbeltes dos pilares, não havia folga para desvio da perfuração, portanto a fixação da máquina de perfuração exigiu alta precisão de forma a manter o furo na posição correta até o ponto de instalação do instrumento;
d) Também houve dificuldade em manter estanqueidade em alguns furos, depois de executada a calda de cimento. Para sanar esse problema, foram realizadas algumas injeções.

6. AVALIAÇÃO DAS SUBPRESSÕES NA CASA DE FORÇA DA USINA

As primeiras leituras realizadas nos 12 novos piezômetros instalados nos 4 blocos da casa de força, ver tabela 2, mostram uma similaridade de medições com as originais efetuadas pelos piezômetros Telemac no início dos anos 80. Esta situação demostra que não houve modificação considerável no comportamento das subpressões no contato concreto/fundação.

Tabela 2 – Valores das primeiras leituras dos instrumentos

Data	Identificador	Cota piezométrica (m)
13/05/2026	PZ-01-CF	247,278
13/05/2026	PZ-02-CF	240,792
13/05/2026	PZ-03-CF	240,782
13/05/2026	PZ-04-CF	240,644
13/05/2026	PZ-05-CF	235,79
13/05/2026	PZ-06-CF	235,59
13/05/2026	PZ-07-CF	240,57
13/05/2026	PZ-08-CF	240,64
13/05/2026	PZ-09-CF	230,7
13/05/2026	PZ-10-CF	230,58
13/05/2026	PZ-11-CF	229,57
29/04/2026	PZ-01-CF	247,209
29/04/2026	PZ-02-CF	241,792
29/04/2026	PZ-03-CF	241,713
29/04/2026	PZ-04-CF	241,574
29/04/2026	PZ-05-CF	240,14
29/04/2026	PZ-06-CF	235,535

Classificação: Setorial

Data	Identificador	Cota piezométrica (m)
29/04/2026	PZ-07-CF	241,47
29/04/2026	PZ-08-CF	240,44
29/04/2026	PZ-09-CF	230,7
29/04/2026	PZ-10-CF	230,58
29/04/2026	PZ-11-CF	229,77
29/04/2026	PZ-12-CF	229,8
20/04/2026	PZ-01-CF	247,219
20/04/2026	PZ-02-CF	241,05
20/04/2026	PZ-03-CF	241,05
20/04/2026	PZ-04-CF	240,901
20/04/2026	PZ-05-CF	239,34
20/04/2026	PZ-06-CF	241,19
20/04/2026	PZ-07-CF	240,67
20/04/2026	PZ-08-CF	240,34
20/04/2026	PZ-09-CF	230,3
20/04/2026	PZ-10-CF	229,68
20/04/2026	PZ-11-CF	229,27
20/04/2026	PZ-12-CF	229,8

Fonte: SYSDAM

Como o reservatório possui baixa variação de nível, é esperado também pouca variação nas leituras dos novos instrumentos instalados.

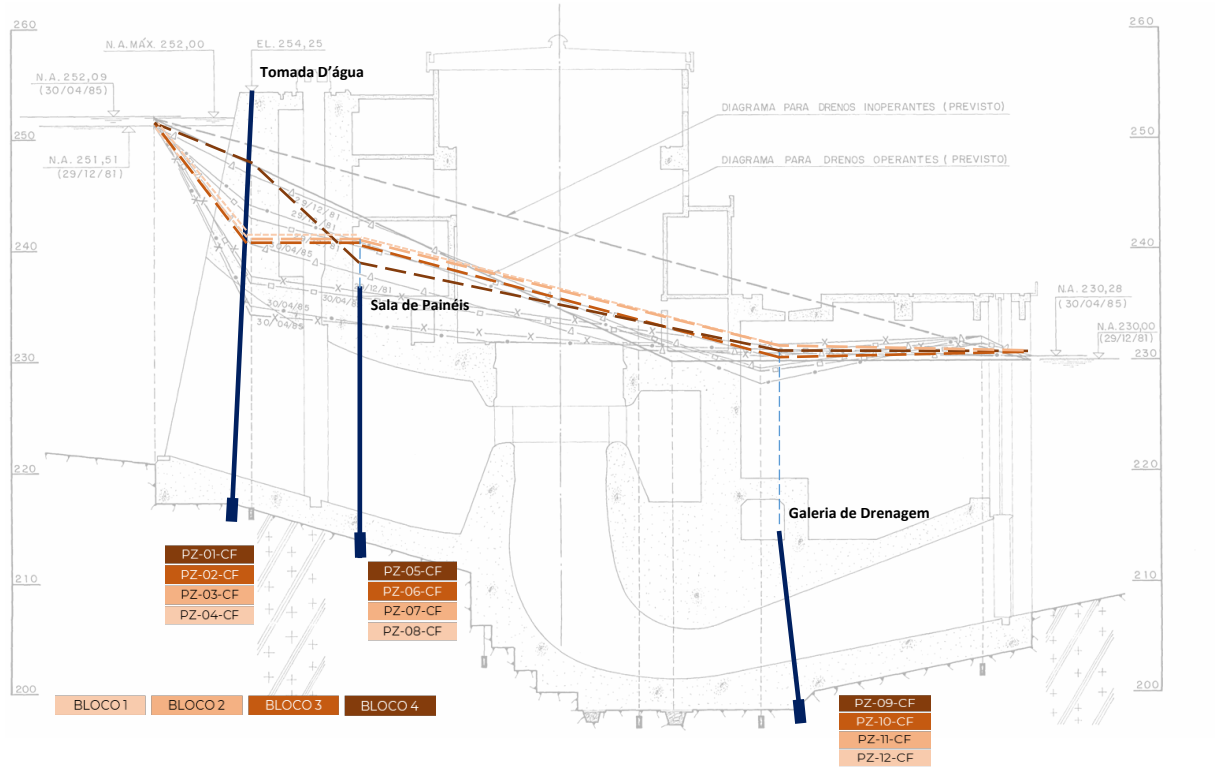


Figura 12 - Linha de subpressão dos piezômetros antigos x novos

Classificação: Setorial

7. CONCLUSÕES

Conclui-se que o restabelecimento das medições na fundação da casa de força da usina Apolônio Sales permitiu retomar uma importante ferramenta de acompanhamento do comportamento das subpressões na estrutura. As primeiras leituras obtidas pelos novos piezômetros indicaram valores compatíveis com os registros históricos, sugerindo que não houve alteração significativa no regime de pressões atuantes no contato concreto-rocha. Esses resultados reforçam a adequação do sistema de drenagem existente e contribuem para a avaliação da estabilidade da fundação, além de fornecer subsídios técnicos relevantes para as ações de segurança, operação e manutenção do empreendimento.

8. PALAVRAS-CHAVE

Subpressões, piezômetros, drenagem.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a 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, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000.

[2] ELETROBRAS-CHESF (2021) – “Relatório de Revisão Periódica de Segurança de Barragens”. Usina Apolônio Sales, Avaliação de Instrumentação, Nº P.014962-RT-G10-065-0E-UAS, emitido pela Tractebel em 11/01/2021.

Classificação: Setorial



CURRÍCULO

Luiz Sergio SIEBER

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP. Especialista em Segurança de Barragem (Universidade Federal da Bahia), Especialista em Engenharia e Análise de Dados (Cesar School - Recife). Engenheiro Civil na AXIA Energia Nordeste. Experiência em gestão de segurança de barragens e manutenção civil de empreendimentos hidroelétricos.



Willamy FERREIRA

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. Especialista em Segurança de Barragens pela Universidade Federal da Bahia - UFBA e Especialista em Gestão de Projetos com BIM pela Puntifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC - RIO. Engenheiro Civil na AXIA Energia Nordeste. Experiência em gestão de segurança de barragens e manutenção civil de empreendimentos hidroelétricos.

INSTALAÇÃO HORIZONTAL DE INCLINÔMETRO: METODOLOGIA, CUIDADOS E APLICAÇÕES

Liliane SANTOS
Engenheira Geotécnico - CSN Mineração

Juliana REZENDE
Engenheira Geotécnico - CSN Mineração

Henrile MEIRELES
Gerente Geral de Barragens - CSN Mineração

André SILVA
Engenheira Geotécnico - Measurand

Thiago SANTOS
Engenheira Geotécnico - Measurand

RESUMO

O trabalho apresenta a metodologia de instalação de um inclinômetro do tipo ShapeArray (SAAV) na posição horizontal em uma pilha de rejeito filtrado localizada no Quadrilátero Ferrífero, no município de Congonhas–MG. A aplicação representa a primeira instalação horizontal dessa tecnologia no Brasil voltada ao monitoramento de pilhas de rejeito. São detalhados o contexto geotécnico da implantação, os materiais empregados, os procedimentos executivos e os cuidados adotados durante a instalação, visando garantir a integridade do sistema e a confiabilidade das medições. A instrumentação foi projetada para permitir o monitoramento contínuo de recalques ao longo do perfil monitorado da estrutura, fornecendo dados relevantes para a avaliação do comportamento geotécnico da pilha ao longo do tempo e, principalmente, na sua fase de alteamento. O trabalho também discute aspectos práticos e desafios associados à instalação horizontal desse tipo de tecnologia em estruturas de disposição de rejeitos.

ABSTRACT

The paper presents the installation methodology of a ShapeArray (SAAV) inclinometer deployed horizontally in a filtered tailings stack located in the Quadrilátero Ferrífero region, in the municipality of Congonhas, Minas Gerais, Brazil. This application represents the first horizontal installation of this technology in Brazil for tailings stack monitoring purposes. The geotechnical context of the installation, the materials used, the installation procedures, and the precautions adopted throughout the process are described in detail, aiming to ensure system integrity and measurement reliability. The instrumentation system was designed to provide continuous settlement monitoring along the monitored profile of the structure, supplying relevant data for evaluating the geotechnical behavior of the stack over time, especially during its raising stages. The paper also discusses practical aspects and challenges associated with the horizontal installation of this type of technology in tailings disposal structures.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Dias (2017), durante a etapa de construção de uma estrutura geotécnica, a instrumentação tem o objetivo de adequar as premissas do projeto ao método construtivo. Além disso, a instrumentação assume características de controle de segurança, detectando variações no comportamento estrutural, hidráulico, geotécnico e operacional na avaliação da estrutura ao longo da sua vida útil.

Segundo Silveira (2013), o conjunto de parâmetros monitorados em obras geotécnicas é amplo, abrangendo pressões, tensões, cargas e variáveis hidráulicas; contudo, destaca-se que o acompanhamento dos deslocamentos, tanto verticais (recalques) quanto horizontais, constitui o aspecto mais relevante para a avaliação do comportamento do maciço e da fundação. Nesse contexto, a instrumentação voltada à medição de deformações assume papel central, uma vez que os deslocamentos refletem diretamente a resposta do solo ou da estrutura às solicitações impostas.

O objetivo principal da instrumentação é fornecer informações para auxiliar na avaliação da segurança de uma estrutura, coletando dados quantitativos sobre seu desempenho e detectando problemas em um estágio inicial e evitável (FROEHLICH; DHAWAN, 2017).

O monitoramento de deformações em pilhas de rejeito constitui uma etapa fundamental para a avaliação do comportamento geotécnico dessas estruturas ao longo de sua vida operacional, especialmente durante as fases de alteamento e disposição contínua de material. Devido à variabilidade dos materiais, às condições construtivas e ao caráter progressivo dessas estruturas, os recalques e deformações tendem a ocorrer de forma heterogênea, tornando essencial a adoção de sistemas de instrumentação capazes de identificar, com precisão, variações no desempenho do maciço. Nesse contexto, a instrumentação geotécnica desempenha papel essencial na coleta de dados confiáveis, contribuindo diretamente para a interpretação do comportamento da estrutura, bem como para o suporte à tomada de decisão e à gestão de riscos.

Tradicionalmente, o monitoramento de recalques é realizado por meio de instrumentos pontuais, os quais, apesar de amplamente consolidados, apresentam limitações quanto à representação contínua dos deslocamentos ao longo da estrutura. Em resposta a essa limitação, a instalação horizontal de inclinômetros surgiu como uma solução moderna e inteligente para compreender de forma mais abrangente o comportamento do solo e das estruturas ao longo do tempo. A aplicação de inclinômetros na configuração horizontal representa uma abordagem ainda incipiente no contexto da engenharia geotécnica, caracterizando-se como uma solução inovadora para o monitoramento de deformações, especialmente em situações nas quais o interesse está concentrado na avaliação de recalques e perfis de deformação ao longo de um eixo linear.

A evolução dessa técnica está diretamente associada à utilização de tecnologias de instrumentação contínua, como os inclinômetros baseados em ShapeArray (SAAV), que representam uma alternativa avançada aos métodos convencionais. Diferentemente dos sistemas tradicionais, a instrumentação distribuída permite a obtenção de medições contínuas ao longo de todo o perfil monitorado, proporcionando elevada resolução espacial e uma melhor compreensão da distribuição dos deslocamentos. Essa característica é particularmente relevante em pilhas de rejeito,

onde os recalques são fortemente influenciados pela variabilidade dos materiais, pelas condições operacionais e pelas sucessivas etapas de alteamento.

O inclinômetro horizontal configura-se, assim, como um instrumento capaz de avaliar diretamente o comportamento do maciço em subsuperfície, por meio da mensuração sistemática de deslocamentos ao longo de um eixo disposto horizontalmente. Diferentemente dos métodos convencionais, essa técnica permite a obtenção de perfis contínuos de deslocamentos verticais e diferenciais, ampliando significativamente a capacidade de interpretação das deformações internas e da resposta do solo aos carregamentos impostos ao longo da evolução construtiva.

Além da elevada densidade de dados, a instalação horizontal de inclinômetros possibilita o acompanhamento contínuo da evolução dos recalques ao longo do tempo, contribuindo para análises mais representativas do comportamento geotécnico da estrutura. Essa abordagem permite identificar com maior sensibilidade deformações diferenciais distribuídas ao longo de uma linha contínua, oferecendo uma leitura mais realista das condições de campo e contribuindo para análises mais seguras e decisões mais assertivas no contexto da engenharia.

Outro aspecto relevante refere-se ao caráter ainda pouco difundido dessa aplicação, o que lhe confere um caráter pioneiro no âmbito da instrumentação geotécnica aplicada ao monitoramento de recalques. Entre suas principais vantagens, destacam-se a alta resolução espacial dos dados, a capacidade de monitoramento contínuo e a maior sensibilidade na detecção de variações ao longo da estrutura. Quando integrada a outros instrumentos geotécnicos, essa técnica amplia significativamente a capacidade de análise, permitindo uma visão mais abrangente e integrada do comportamento da pilha de rejeito, o que favorece abordagens mais robustas na avaliação da estabilidade e da segurança operacional.

Entretanto, a confiabilidade dos dados obtidos está diretamente relacionada à qualidade da instalação e aos procedimentos executivos adotados em campo. Aspectos como a geometria da trincheira, a proteção mecânica do sensor, a seleção adequada dos materiais de envelopamento, bem como a realização de testes e calibração, exercem influência direta no desempenho e na durabilidade do sistema. Nesse sentido, é fundamental que todas as etapas, desde a implantação até a aquisição de dados, sejam conduzidas com rigor técnico, garantindo o funcionamento adequado do sistema mesmo em condições desafiadoras.

Dessa forma, a utilização de inclinômetros horizontais se consolida como uma alternativa promissora para o monitoramento de recalques em estruturas geotécnicas complexas, especialmente em pilhas de rejeito, contribuindo para o avanço das técnicas de instrumentação e para o aumento da confiabilidade na avaliação do comportamento e da segurança dessas estruturas.

2. INSTALAÇÃO HORIZONTAL DE INCLINÔMETRO

2.1. Instalação

O processo de instalação do inclinômetro horizontal foi realizado por meio da execução de uma trincheira escavada com o uso de retroescavadeira, apresentando dimensões aproximadas de 0,80 m de largura, cerca de 100 m de comprimento e

profundidade média de 0,70 m. No interior da trincheira, procedeu-se à instalação de uma manta geotêxtil ao longo de todo o seu invólucro. Sobre o fundo, foi aplicada uma camada de areia grossa lavada, destinada a proporcionar regularização. No eixo central da trincheira, foi instalado o inclinômetro, introduzido em tubo geomecânico rosqueável (Figura 1). A Figura 2 mostra a seção tipo representativa da instalação de inclinômetro horizontal em pilha de rejeito.

Após o posicionamento do equipamento, este foi envolvido por nova camada de areia grossa lavada envolta pelo geotêxtil, seguida do reaterro com rejeito de mineração.



Figura 1– Sequência executiva da trincheira para instalação de inclinômetro horizontal até ao fechamento com material do aterro

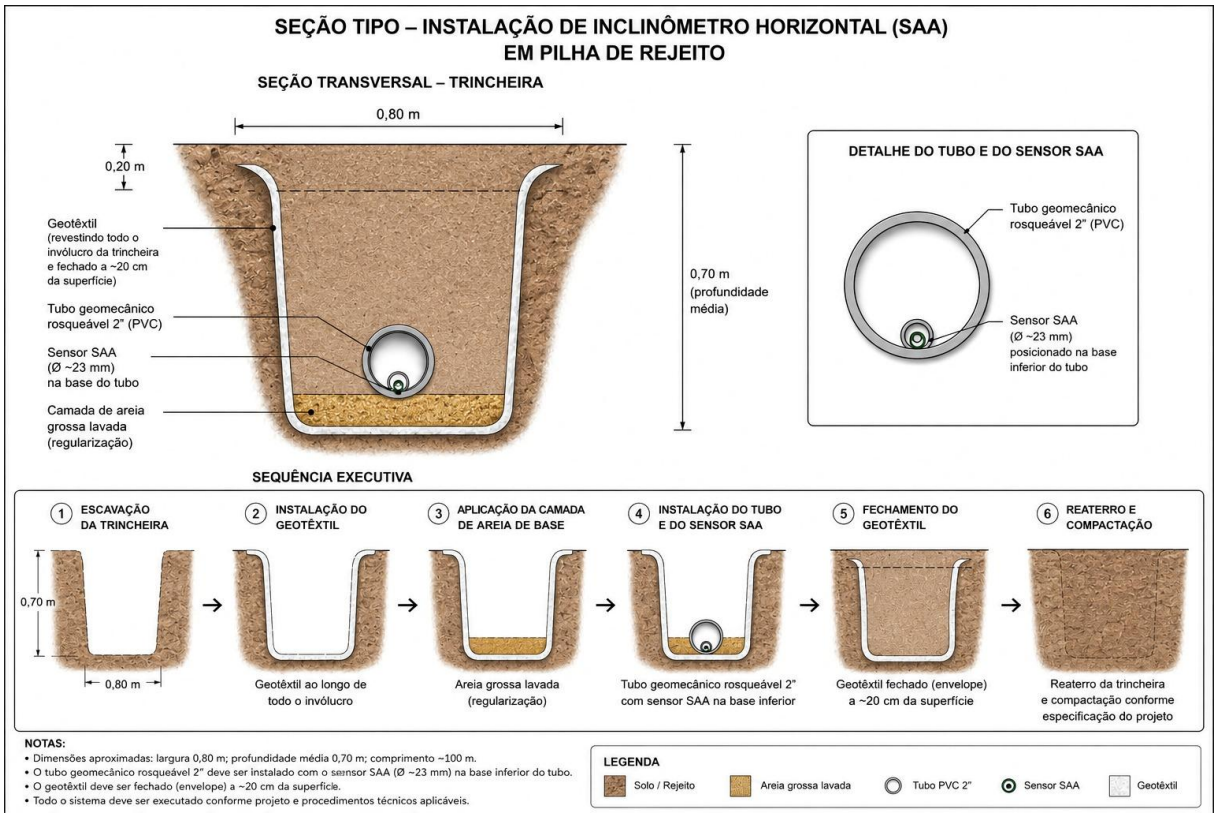


Figura 2– Seção tipo – Instalação de inclinômetro horizontal em pilha de rejeito

A instalação deve ser realizada com rigoroso controle das condições da trincheira, garantindo a ausência de água no seu interior, de modo a assegurar a integridade do equipamento e a qualidade do contato entre o instrumento e o meio envolvente, sendo essencial a adoção de procedimentos executivos adequados que previnam interferências externas e possibilitem a correta aferição dos deslocamentos.

O sensor do inclinômetro horizontal foi instalado com trecho engastado em terreno natural (Figura 3), de forma a constituir uma referência estável e indeformável para as medições. O trecho inicial deve ser firmemente ancorado no solo natural, assegurando restrição de movimentos relativos. Deve-se garantir adequado acoplamento entre o instrumento e o meio envolvente. É importante assegurar a ausência de água durante a instalação, evitar vazios e assegurar a continuidade geométrica do tubo, garantindo a confiabilidade das leituras de deslocamento ao longo do tempo.



Figura 3– Locação do inclinômetro na pilha do Fraile (Earth,2026)

O instrumento é alimentado por um datalogger wireless equipado com bateria de lítio, responsável pela aquisição e transmissão das leituras para a central de monitoramento, permitindo o acompanhamento contínuo do comportamento da estrutura.

Durante os primeiros meses de operação, as leituras foram obtidas localmente em campo, por meio da extração manual dos dados diretamente no datalogger, uma vez que o sistema de telemetria e automação ainda se encontrava em fase de implementação.

As leituras iniciais tiveram como principal objetivo a calibração e verificação do funcionamento do sistema de instrumentação. Dessa forma, os dados obtidos neste período ainda não representam uma condição de deformação contínua da pilha, considerando que a área monitorada se encontrava em estágio inicial de empilhamento e alteamento da estrutura.

2.2. Monitoramento

O instrumento vem sendo monitorado de forma contínua e, até o presente momento, não apresenta variações significativas nos deslocamentos medidos, o que está

diretamente associado à ausência de avanço construtivo da pilha nesta área. Com a retomada das atividades de empilhamento, prevista para o período de estiagem, espera-se a indução de novos carregamentos sobre o maciço, possibilitando a ocorrência de respostas deformacionais mais representativas, que deverão ser captadas pela instrumentação.

O inclinômetro configura-se como instrumento relevante para a detecção e o acompanhamento de deformações no interior do maciço, permitindo a identificação de deslocamentos relativos ao longo do eixo de instalação. Durante a fase inicial de edificação da pilha, é esperado um processo de acomodação do terreno natural subjacente, predominantemente associado a deformações compressivas induzidas pelo carregamento. Tais deformações tendem a apresentar distribuição não uniforme, sendo usualmente menos expressivas nas regiões periféricas e mais intensas na porção central da pilha, em função da maior concentração de tensões nesse setor, caracterizando uma zona de maior compressibilidade e potencial de recalque diferencial.

As leituras do inclinômetro serão analisadas em conjunto com os dados provenientes das placas de recalque previstas para instalação na base da estrutura. A integração desses instrumentos permitirá o cruzamento e a validação das informações obtidas em campo, contribuindo para uma interpretação mais robusta do comportamento da pilha e para o desenvolvimento futuro de modelos e critérios de avaliação de risco geotécnico. Complementarmente, os dados de instrumentação deverão ser correlacionados com ensaios geotécnicos laboratoriais realizados em corpos de prova representativos dos materiais da pilha, possibilitando uma melhor compreensão da relação entre deformações observadas e comportamento mecânico dos materiais.

Durante esta etapa inicial de monitoramento, os dados obtidos passam por procedimentos de validação e tratamento, incluindo a identificação e remoção de leituras espúrias (outliers), bem como a normalização das medições consideradas consistentes e representativas do comportamento da estrutura. Conforme apresentado na Figura 4, as leituras iniciais ainda não demonstram uma tendência deformacional claramente definida, comportamento esperado para a atual fase do projeto e para o estágio inicial de evolução da pilha.

Até a data das últimas aquisições, os resultados apresentaram comportamento relativamente estável a partir de aproximadamente 60 dias de monitoramento, registrando deslocamentos acumulados variando entre +5 mm e -15 mm ao longo de todo o perfil instrumentado, com extensão aproximada de 95 m.

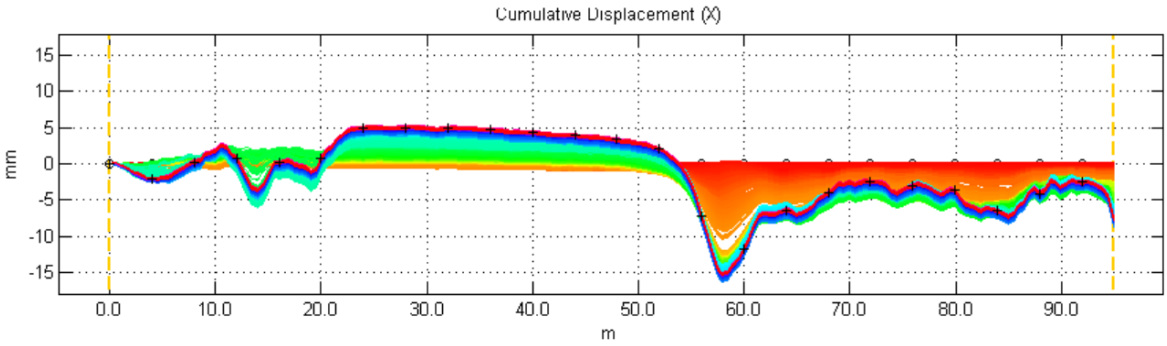


Figura 4– Apresentação gráfica dos dados (SaaView,2026)

Destaca-se que o inclinômetro horizontal fornece leituras distribuídas a cada 0,5 m, totalizando aproximadamente 190 pontos contínuos de monitoramento ao longo do perfil. A precisão do sistema é dada em função de seu comprimento sensorizado, que é calculada através da fórmula a seguir e aplicada graficamente através da Figura 5.

$$Precisão = \sqrt{(\frac{95m}{30})} * \pm 0{,}5 = \pm 0{,}9mm$$

Esse elevado nível de resolução espacial representa uma característica ainda pouco comum em estruturas desse tipo, permitindo uma avaliação mais detalhada da distribuição dos recalques e deformações ao longo da fundação da pilha. Espera-se que essa abordagem forneça informações relevantes durante as futuras etapas de alteamento e evolução operacional da estrutura.

Entretanto, a continuidade do monitoramento permitirá o estabelecimento de uma linha de base (baseline) confiável para acompanhamento da evolução futura dos deslocamentos na fundação da pilha.

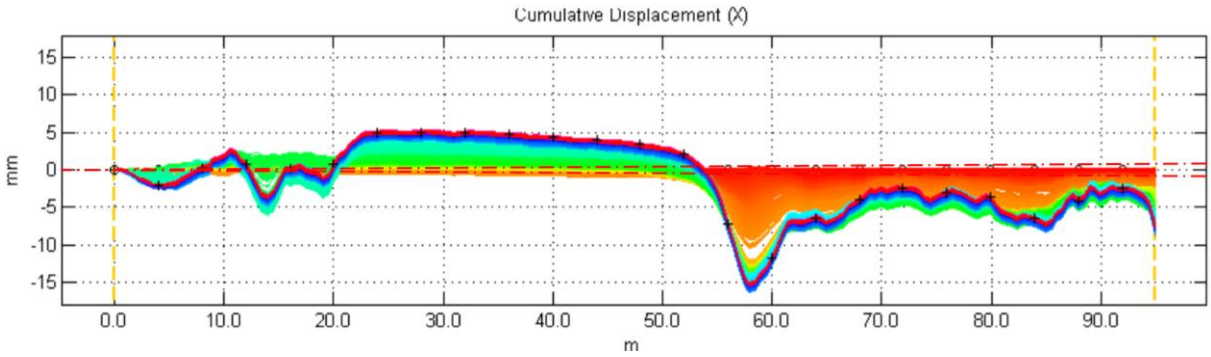


Figura 5– Representação gráfica da precisão do sistema (SaaView,2026)

No que se refere à interpretação dos dados de inclinometria, a análise fundamenta-se na avaliação das variações de inclinação ao longo do eixo instrumentado, as quais são convertidas em deslocamentos acumulados, possibilitando a construção de perfis de deformação do maciço. A comparação entre leituras sucessivas permite identificar a magnitude, a direção e a taxa dos deslocamentos, bem como possíveis zonas de concentração de deformação. A interpretação adequada desses dados requer a análise integrada do histórico de leituras, das condições de carregamento e da evolução construtiva, sendo essencial para a identificação de comportamentos diferenciais, tendência de acomodação e eventuais indícios de instabilidade, contribuindo para a tomada de decisão e gerenciamento de riscos geotécnicos.

3. CONCLUSÕES

Em conclusão a medição de recalques por meio do inclinômetro, especialmente na posição horizontal, se mostra uma ferramenta extremamente relevante dentro da metrologia aplicada à engenharia. Sua elevada sensibilidade à detecção de pequenas variações permite a identificação e o acompanhamento de deformações no maciço, possibilitando uma interpretação mais robusta do comportamento de estruturas e fundações submetidas a carregamentos. Dessa forma, contribui de maneira significativa para a avaliação da estabilidade e para o aumento da segurança de obras geotécnicas ao longo de sua vida útil.

No contexto de aplicações práticas, como em estruturas geotécnicas, o uso do inclinômetro horizontal amplia ainda mais essa importância, pois possibilita o acompanhamento detalhado de recalques ao longo do tempo. Essa visão contínua do comportamento da estrutura fornece subsídios fundamentais para a tomada de decisão preventiva, reduzindo riscos e aumentando a confiabilidade das operações.

Assim, mais do que um instrumento de medição, o inclinômetro horizontal se torna uma ferramenta estratégica, que, quando bem utilizada e corretamente mantida, contribui diretamente para a qualidade dos dados, a segurança das estruturas e a confiança nas análises realizadas.

A instalação horizontal de inclinômetros não é apenas uma alternativa técnica, mas uma evolução no modo de monitorar estruturas, trazendo mais confiança, previsibilidade e segurança para os projetos de engenharia.

A implementação de inclinômetro horizontal em pilha de rejeito, é uma metodologia inédita no Brasil, que se acredita ser uma metodologia disruptiva para monitoramento de pilha, que trará segurança para a empresa sob o aspecto estrutural e os limites de resistência da base da pilha em edificação em tempo real.

4. PALAVRAS-CHAVE

Empilhamento, Pilha de rejeito, recalque, inclinômetro horizontal.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DIAS, M. V. L. (2017) – “Avaliação da segurança de barragens por meio da análise de instrumentação geotécnica”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/Geotecnia)

SILVEIRA, J. F. A. (2013) “Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento”. 2. Ed. [S. l.]: Oficina de textos.

FROEHLICH, D.; DHAWAN, D. Guidelines for Instrumentation of Large Dams. 1. ed. Índia: Dam Rehabilitation and Improvement Project, 2017.



Liliane SANTOS

Engenheira Geotécnica na CSN Mineração, com atuação no monitoramento de barragens e pilhas de rejeito filtrado. Possui experiência na análise de estabilidade, instrumentação geotécnica e interpretação de dados de campo, contribuindo para a segurança e o desempenho de estruturas geotécnicas ao longo das fases construtiva e operacional.

	**Juliana REZENDE** Engenheira Geotécnica na CSN Mineração, atua no monitoramento de barragens e pilhas de rejeito filtrado. Doutora e mestre em Geotecnia, com pesquisas em resíduos siderúrgicos, misturas asfálticas e obras geotécnicas. Engenheira Civil pela UFSJ, com experiência em projetos geotécnicos e infraestrutura, com foco em estabilidade, monitoramento, instrumentação geotécnica e interpretação de ensaios de campo e laboratório.
	**Henrile MEIRELES** Geólogo de formação e Gerente Geral na CSN Mineração, com atuação em monitoramento de barragens e pilhas de rejeito, além de participação em obras geotécnicas e projetos de descaracterização de barragens. Possui experiência em exploração geológica e direito minerário, com foco em gestão de riscos e suporte técnico a projetos e processos regulatórios.
	**André SILVA** Engenheiro Civil, Mestre pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com especialização na área de Geotecnia. Engenheiro membro da Ordem dos Engenheiro portuguesa e CREA-SP no Brasil. Associado das entidades geotécnicas SPG (Sociedade Portuguesa de Geotecnia) e ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos).
	**Thiago SANTOS** Engenheiro geotécnico. Tendo como principais atribuições: coordenar equipes de perfuração para instalação de instrumentos, coordenar equipes de leitura e instalação, realizar supervisão técnica, elaborar relatórios, propostas técnicas, treinamentos e procedimentos operacionais.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.2
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DE VIGAS MUNHÃO EM VERTEDOURO COM COMPORTAS

Stella Almeida Fernandes BRITO
Engenheira Civil - G5 Engenharia e Gerenciamento LTDA

Pamela Vargas DANILISZYN
Engenheira Civil - G5 Engenharia e Gerenciamento LTDA

Wilson SOARES Junior
Diretor de Instrumentação e Tecnologia - G5 Engenharia e Gerenciamento LTDA

RESUMO

O sistema extravasor da barragem em estudo é constituído por duas comportas instaladas no vertedouro, que operam regularmente, assegurando o controle do nível do reservatório e a segurança estrutural da obra. As vigas munhão do vertedouro controlado desempenham a função de suporte estrutural dos mecanismos de acionamento das comportas do tipo segmento. A necessidade de monitoramento da estrutura surgiu a partir da identificação de eflorescências na face de jusante do concreto de segundo estágio dos nichos de ancoragem da protensão. Desde então, vêm sendo conduzidas investigações voltadas à avaliação da integridade do concreto, das cordoalhas de protensão e das condições estruturais das vigas munhão. Nesse contexto, este artigo apresenta um estudo de caso de monitoramento estrutural das vigas munhão de um vertedouro por meio de sensores elétricos, visando à análise do comportamento da estrutura. Foram utilizados medidores triortogonais e extensômetros (*strain gauges*) para o monitoramento contínuo dos deslocamentos horizontais, verticais e das deformações na região de contato entre viga e pilar, permitindo a identificação de eventuais alterações estruturais. Os medidores triortogonais foram instalados na face superior da estrutura, no contato pilar–viga munhão, enquanto os *strain gauges* foram posicionados na face lateral dos pilares, sendo dois no pilar central e um em cada um dos pilares das extremidades esquerda e direita. São apresentados o projeto de instrumentação, os resultados obtidos e as considerações decorrentes da análise de 45 dias de monitoramento.

ABSTRACT

The spillway system of the dam under study consists of two gates installed on the spillway, which operate regularly to ensure reservoir level control and the structural safety of the facility. The trunnion beams of the gated spillway perform the structural support function for the operating mechanisms of the radial gates. The need for structural monitoring arose following the identification of efflorescence on the downstream face of the second-stage concrete in the prestressing anchorage recesses. Since then, investigations have been conducted to assess the integrity of the concrete, the prestressing strands, and the structural conditions of the trunnion beams. In this context, this paper presents a case study on the structural monitoring of spillway trunnion beams using electrical sensors, aiming to analyze the structural behavior. Triorthogonal joint meters and strain gauges were used for continuous monitoring of horizontal and vertical displacements, as well as strains in the beam-to-pier connection region, allowing the identification of possible structural changes. The triorthogonal joint meters were installed on the upper face of the structure, at the pier–trunnion beam interface, while the strain gauges were positioned on the lateral face of the piers, with two installed on the central pier and one on each of the left and right end piers. The instrumentation design, the results obtained, and the considerations derived from 45 days of monitoring analysis are presented.

1. INTRODUÇÃO

O sistema extravasor da barragem é composto por duas comportas localizadas no vertedouro, as quais operam regularmente, garantindo o controle do nível do reservatório e a segurança estrutural da barragem.

As vigas munhão de vertedouros controlados são elementos estruturais responsáveis pela sustentação dos mecanismos de acionamento das comportas do tipo segmento, sendo responsáveis pela sustentação dos mecanismos de acionamento e pela transferência das cargas hidrostáticas atuantes nas comportas para os pilares laterais e para a estrutura de concreto da barragem. Esses componentes atuam como suporte dos eixos de rotação das comportas, denominados munhões, estando submetidos a elevados esforços concentrados, especialmente durante condições críticas de operação e eventos de cheia [1].

Em estruturas de concreto, as vigas munhão apresentam, em geral, elevada taxa de armadura e, frequentemente, sistemas de protensão longitudinal e transversal, em função das solicitações de flexão, cisalhamento e compressão localizada. Além disso, sua concepção estrutural busca garantir adequada rigidez e durabilidade, reduzindo problemas relacionados à cavitação, corrosão e dificuldades de manutenção ao longo da vida útil da estrutura.

Do ponto de vista estrutural, a integridade da viga munhão é fundamental para a segurança operacional do vertedouro, uma vez que deformações excessivas, fissuração ou falhas localizadas podem comprometer o alinhamento e o funcionamento das comportas. Dessa forma, projetos de barragens e usinas hidrelétricas incorporam critérios rigorosos de dimensionamento, considerando ações hidrostáticas, carregamentos dinâmicos e efeitos de fadiga associados às manobras de abertura e fechamento das comportas. As cargas atuantes nas comportas segmento são transferidas aos munhões e, consequentemente, às vigas munhão e seus sistemas de ancoragem, tornando esses elementos críticos para a estabilidade global do conjunto estrutural [1].

Entretanto, devido ao elevado nível de solicitação estrutural e à presença de protensão, o envelhecimento das estruturas aliado ao aumento das demandas operacionais pode favorecer o surgimento de manifestações patológicas, como fissuras, corrosão das armaduras, desgaste superficial do concreto e processos deletérios associados à reação álcali-agregado (RAA) e à formação de eflorescências. Nesse contexto, inspeções periódicas e sistemas de monitoramento estrutural tornam-se fundamentais para o acompanhamento contínuo do comportamento das vigas munhão e para a avaliação de sua condição de segurança ao longo da operação da barragem.

Nesse sentido, este artigo apresenta um estudo de caso de monitoramento de vigas munhão de um vertedouro utilizando sensores elétricos para avaliação do comportamento da estrutura. Esses sensores monitoram continuamente a movimentação das estruturas, possibilitando a detecção de possíveis alterações ou deformações, assegurando um acompanhamento preciso das condições da barragem e facilitando a tomada de decisões preventivas. São apresentados o projeto de instrumentação, os resultados obtidos e considerações a respeito dos resultados obtidos durante 45 dias de monitoramento.

2. PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO

O vertedouro monitorado é composto por dois vãos. Há, portanto, duas comportas do tipo segmento sustentadas por três vigas munhão, esquerda hidráulica, central e direita hidráulica. Para o monitoramento estrutural das vigas munhão foram utilizados dois modelos de sensores elétricos: medidor triortogonal de junta, composto por *crackmeters* de corda vibrante, e *strain gauges* de corda vibrante. A Figura 1 apresenta a localização dos instrumentos em planta.

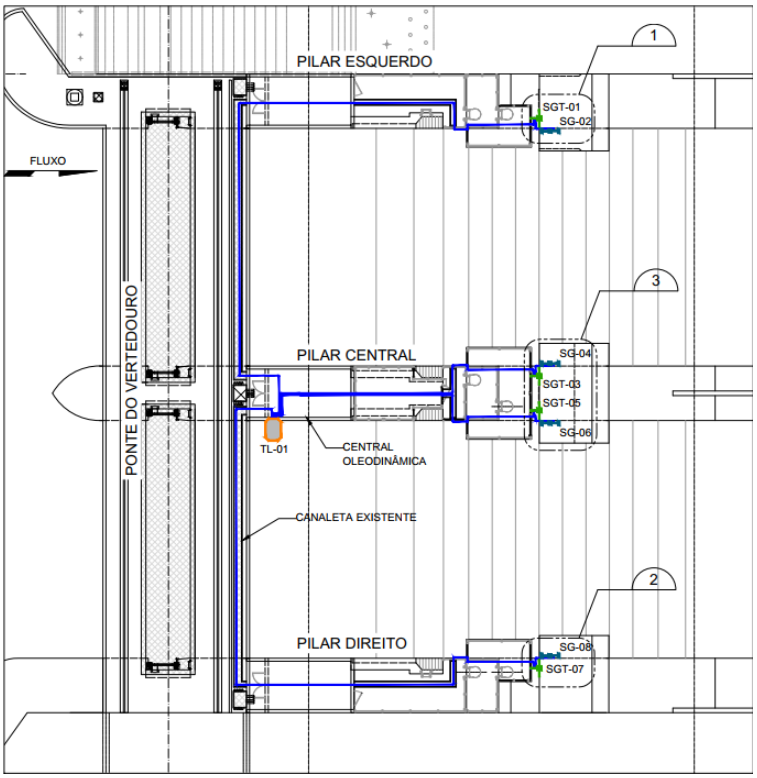


Figura 1 - Planta de localização da instrumentação.

Para o projeto, foram instalados, na face superior da estrutura e na região de ligação entre o pilar e a viga munhão, dois medidores triortogonais no pilar central e um medidor em cada um dos pilares das extremidades esquerda e direita do vertedouro. Os medidores triortogonais possuem a sigla SGT.

Os *strain gauges*, por sua vez, foram instalados na face lateral dos pilares, sendo posicionados dois no pilar central e um em cada um dos pilares das extremidades esquerda e direita. Os sensores estão representados com a sigla SG.

A Figura 2 representa a posição dos sensores de monitoramentos instalados na estrutura em corte.

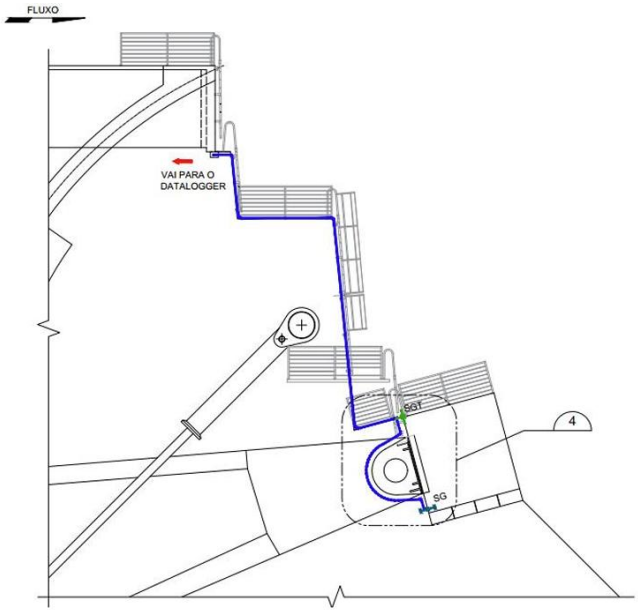


Figura 2 - Posição dos sensores representado em corte.

Para a análise dos dados obtidos, foram selecionados os sensores instalados em um dos vãos da estrutura, abrangendo especificamente o pilar direito. Os instrumentos considerados foram os sensores SGT-05, SG-06, SG-08 e SGT-07.

O período analisado corresponde a 45 dias de monitoramento contínuo, com registros coletados a cada 15 minutos por um *datalogger*, totalizando uma série histórica com 4.486 dados.

2.1 Medidor Triortogonal de Junta Automatizado

O medidor triortogonal de junta automatizado aplicado se trata de um conjunto de dois sensores modelo 4420 da fabricante Geokon para monitoramento de movimentos de abertura e fechamento entre viga e pilar (eixo “x”) e deslocamento cisalhante (eixo “y”). O sensor consiste em um elemento de corda vibrante conectado em série a uma mola, que é conectada a uma haste na outra extremidade. À medida que a haste se desloca, a tensão atuante na mola, que é captada pelo sensor de corda vibrante, se altera. Alterações na vibração da corda são proporcionais aos deslocamentos da haste [3].

Para o monitoramento dos deslocamentos de recalque (eixo “z”), o sensor utilizado é uma variação do sensor modelo 4420, chamado de *low profile crackmeter* (4420-3). O modelo 4420-3 utiliza um *strain gauge* de corda vibrante montado sobre uma placa metálica fixada a um ponto ajustável. Movimentos de recalque entre as estruturas monitoradas ocasionam movimentação da placa metálica, que geram variação na leitura da corda vibrante.

A Figura 3 apresenta o esquema de instalação do medidor triortogonal elétrico, instalado na face superior das estruturas, e a orientação dos deslocamentos com base no sinal obtido com a leitura.

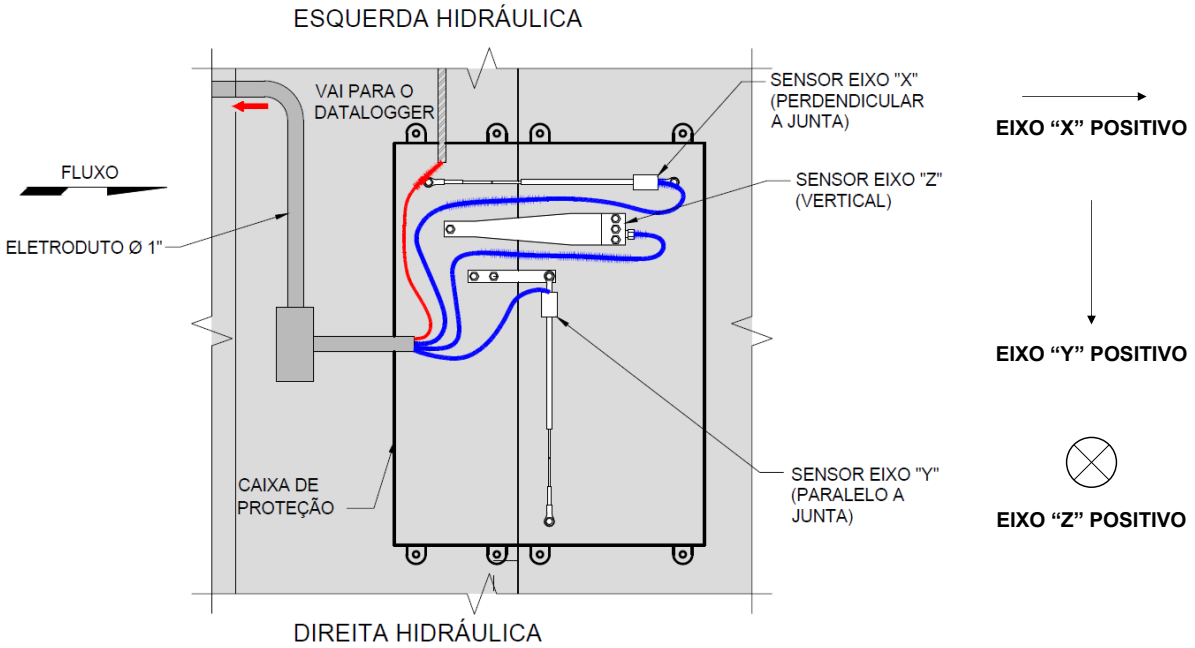


Figura 3 – Esquema de instalação do medidor triortogonal e orientação dos deslocamentos.

2.1.1 Procedimento de Instalação

A implantação do medidor triortogonal é realizada por meio de três sensores, para medição dos deslocamentos nas direções “x”, “y” e “z”. Os sensores são fixados com uso de chumbadores e espaçadores de aço inox. A Figura 4 apresenta o esquema para a instalação dos sensores.

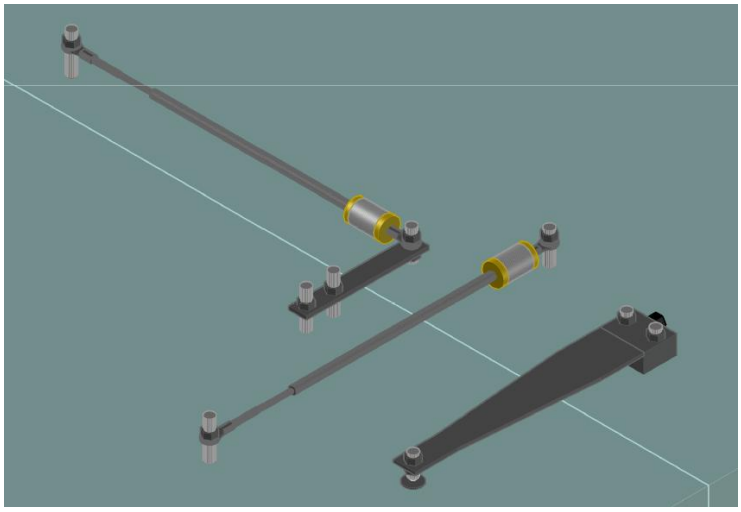


Figura 4 – Esquema para a instalação dos sensores.

Para a instalação do medidor do eixo “x”, cada extremidade do sensor é fixada em um dos lados da junta, permitindo a leitura dos deslocamentos de abertura e fechamento.

Para a instalação do sensor para medição do eixo “y” indicado na figura anterior, uma placa de aço inox é utilizada como apoio. Em um lado da junta, o sensor é fixado em uma extremidade com uso do chumbador e do espaçador. A outra extremidade é fixada à placa de aço inox, que será engastada no lado oposto da junta por dois

chumbadores, também utilizando espaçadores. Dessa forma, o sensor pode deslocar livremente de no sentido cisalhante da junta, permitindo o registro dos deslocamentos cisalhantes.

Por fim, para o eixo “z”, a fixação do instrumento na estrutura é realizada apenas no lado que contém a corda vibrante (lado da saída do cabo). O lado oposto é apoiado em um disco de referência, que é engastado no concreto. Dessa forma, o instrumento tem liberdade para deslocamentos de recalque e elevação.

2.2 Strain Gauge de Corda Vibrante

Os transdutores de corda vibrante têm seu princípio de funcionamento baseado na utilização de um fio de aço tensionado e fixado em suas extremidades, permitindo que este vibre livremente em sua frequência natural. A frequência de vibração do fio varia em função da tensão aplicada, a qual é influenciada por pequenos deslocamentos relativos entre os pontos de fixação do instrumento [2]. Dessa forma, as alterações na frequência podem ser correlacionadas às deformações sofridas pela estrutura monitorada.

O funcionamento do sistema ocorre por meio da excitação magnética do fio, realizada por uma bobina elétrica posicionada próxima ao seu ponto médio. Essa mesma bobina, ou uma segunda bobina dedicada, é responsável pela leitura da frequência de vibração. A partir da medição da frequência natural do fio e de suas variações ao longo do tempo, é possível determinar as deformações desenvolvidas no elemento estrutural monitorado. Os sensores instalados em superfície podem ser fixados por meio de parafusamento ou soldagem a arco, conforme as características e condições da estrutura [2].

O sensor *strain gauge* utilizado neste estudo foi o Modelo 4000 da fabricante Geokon, empregado no monitoramento de pequenas deformações na interface entre o pilar e a viga munhão dos vertedouros. O instrumento foi fixado em concreto por meio do grauteamento dos blocos de montagem.

As leituras são realizadas por meio de um equipamento leitor, que converte a frequência medida em deformação específica, apresentando os resultados diretamente em microdeformações (με). O instrumento possui comprimento de base de 150 mm, faixa de medição de 3000 με e sensibilidade de 1 με, características que permitem elevada precisão na detecção de pequenas variações deformacionais em estruturas hidráulicas.

Os *strain gauges* de corda vibrante apresentam como principal característica a transmissão do sinal de saída na forma de frequência, e não em magnitude de resistência elétrica ou tensão. Essa característica torna o sistema significativamente menos suscetível a interferências associadas à resistência elétrica dos cabos, resistência de contato, correntes de fuga, variações de umidade e grandes extensões de cabeamento [4].

No monitoramento das vigas munhão do vertedouro, essa característica torna-se particularmente relevante, uma vez que tais estruturas estão inseridas em um ambiente hidráulico sujeito à ação contínua da água, variações de temperatura, condensação e elevada umidade relativa.

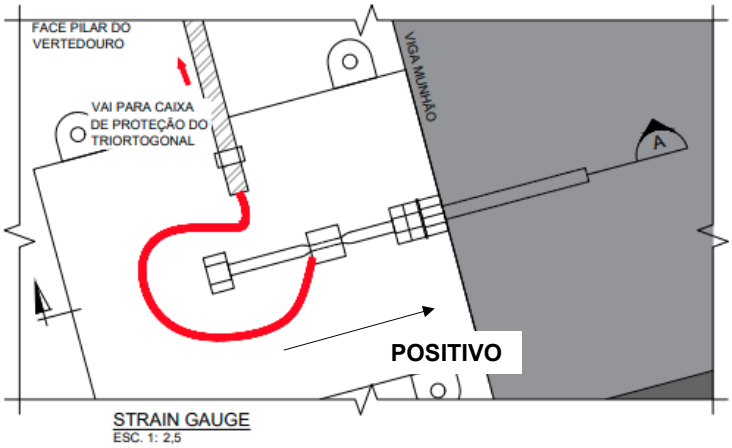


Figura 5 - Esquema de instalação do *strain gauge* e orientação da deformação.

2.2.1 Procedimento de Instalação

Usualmente o *strain gauge* é fixado em juntas formadas em superfícies paralelas, porém a instalação do sensor para monitoramento da viga munhão procedeu com uma extremidade instalada em superfície perpendicular a superfície de referência, como mostra a Figura 6.

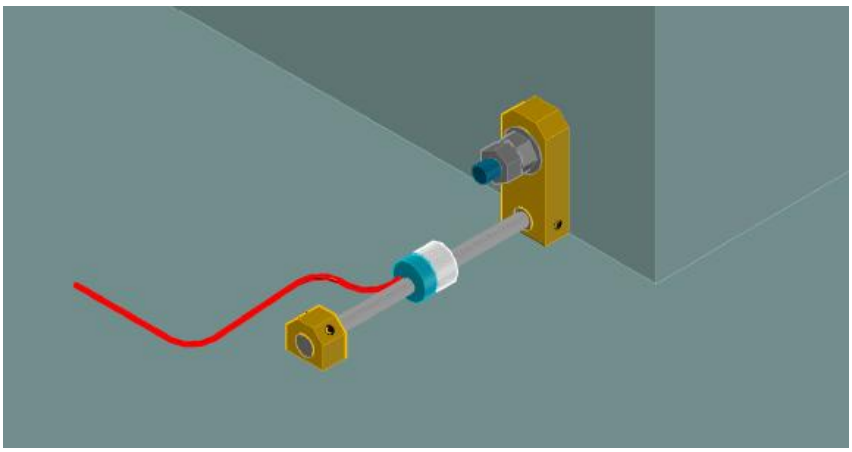


Figura 6 – Esquema de instalação do *strain gauge*.

O instrumento é fixado diretamente à estrutura de concreto por meio de suportes ancorados, permitindo que as deformações ocorridas no elemento estrutural sejam transmitidas ao sensor ao longo da operação da comporta e das variações de carregamento atuantes na viga.

3. RESULTADO DO MONITORAMENTO

Neste capítulo serão apresentados os gráficos do monitoramento e as análises dos sensores instalados nas vigas munhão do estudo de caso.

3.1 Medidor Triortogonal de Junta Automatizado

As unidades básicas utilizadas pela Geokon para medição e redução de dados do medidor de deformação são dígitos. Para converter dígitos em deslocamento, deve-se aplicar a seguinte equação:

$$D = (R_1 - R_0) \times G \quad (1)$$

Sendo:

D = Deslocamento em milímetros (mm);

R_1 = Leitura atual em Dígitos;

R_0 = Leitura inicial em Dígitos, realizada no momento da instalação;

G = Fator de conversão do instrumento em mm/Dígitos, apresentado na ficha de calibração.

Para o sensor modelo 4420-1, instalado para o eixo “x” e “y”, há um coeficiente térmico de expansão com valor muito pequeno, então a correção térmica não é recomendada na maioria dos casos. Contudo, se é necessária uma acurácia máxima ou as mudanças de temperaturas são extremas (>10°C) as correções podem ser aplicadas. A fórmula aplicada é com base na seguinte equação:

$$T_{Corrigida} = K \times (T_1 - T_0) \quad (2)$$

Onde:

$T_{Corrigida}$ = Temperatura corrigida, em °C;

K = Fator térmico, que precisa ser calculado;

T_1 = Temperatura atual em °C;

T_0 = Temperatura inicial em °C, realizada no momento da instalação.

A determinação do fator térmico K é baseado na fórmula representada na equação:

$$K = [(R_1 \times M) + B) \times G] \quad (3)$$

Onde:

R_1 = Leitura atual em Dígitos;

M = Multiplicador;

B = Fator de correção experimental do lote;

G = Fator de conversão do instrumento em mm/Dígitos, apresentado na ficha de calibração.

Para o cálculo do fator térmico para cada sensor do medidor triortogonal, deve ser consultado o manual da Geokon para determinar os valores de M e B de acordo com o modelo utilizado [3].

Para o sensor modelo 4420-3, instalado no eixo “z”, uma pequena correção pode ser feita de acordo com a temperatura. Com o aumento da temperatura registrada pelo sensor, a leitura registrada do sensor diminui cerca de um dígito por °C. Para calcular o deslocamento no eixo “z”, corrigido pela temperatura, é utilizada a equação:

$$D_{Corrigido} = G \times [(R_1 - R_0) + (T_1 - T_0)] \quad (4)$$

Sendo:

G = Fator de conversão do instrumento em mm/Dígitos, apresentado na ficha de calibração;

R_1 = Leitura atual em Dígitos;

R_0 = Leitura inicial em Dígitos, realizada no momento da instalação;

T_1 = Temperatura atual em °C;

T_0 = Temperatura inicial em °C, realizada no momento da instalação.

A extensão da mola do instrumento implica em valores positivos de deslocamento, enquanto a compressão implicará em valores negativos de deslocamento.

Os medidores triortogonais de junta foram posicionados estrategicamente para monitorar os deslocamentos da junta entre o pilar e a viga munhão, sendo um no pilar da direita hidráulica e outro no pilar central.

Para os medidores triortogonais, a interpretação dos dados obtidos deve considerar:

- Sensor instalado no eixo “x” (perpendicular a junta): leituras positivas indicam deslocamento da viga para jusante, ou seja, abertura em relação ao pilar e leituras negativas indicam fechamento, ou seja, uma aproximação entre a viga e o pilar;
- Sensor instalado no eixo “y” (paralelo a junta): leituras positivas indicam deslocamento para direita hidráulica e leituras negativas indicam deslocamento para esquerda hidráulica;
- Sensor instalado no eixo “z” (vertical): leituras positivas indicam um deslocamento para baixo da viga, ou seja, um recalque entre a viga e o pilar e leituras negativas indicam uma ascensão da viga em relação ao pilar.

Os dados analisados são dos sensores SGT-05 e SGT-07 instalados na estrutura.

3.1.1 Sensor SGT-05

O sensor SGT-05 está instalado no pilar central a direita hidráulica para o monitoramento da estrutura. Ao longo do período de 45 dias, para o eixo “x” é possível observar variações de 0,05 milímetros no sentido de abertura (valores positivos) e de 0,07 milímetros no sentido de fechamento (valores negativos). A Figura 7 apresenta os dados obtidos, calculados com a correção de temperatura para o eixo “x” do sensor SGT-05.

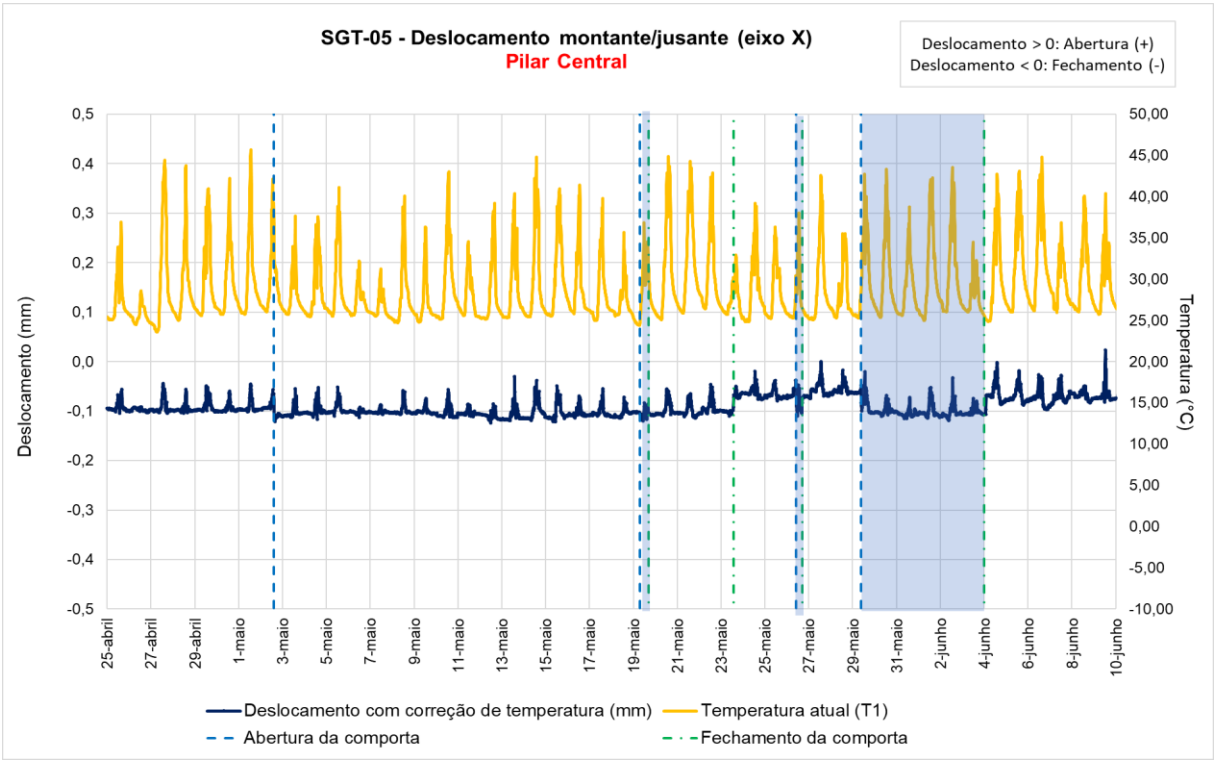


Figura 7 – Deslocamento calculado com correção de temperatura para o eixo “x” do sensor SGT-05.

O comportamento registrado evidencia uma relação direta entre as variações de deslocamento medidas pelo instrumento e as manobras operacionais da comporta, demonstrando a sensibilidade do sensor às alterações de carregamento estrutural impostas ao sistema.

A curva azul representa os deslocamentos corrigidos pela temperatura, enquanto a curva amarela corresponde à temperatura medida pelo termistor interno do instrumento. Observa-se que os valores de deslocamento permaneceram predominantemente negativos durante grande parte do período monitorado, indicando uma condição de fechamento relativo da junta estrutural. Entretanto, nos instantes associados ao fechamento da comporta, identificados pelas linhas tracejadas verdes, verifica-se aumento dos valores de deslocamento em direção ao sentido positivo, caracterizando movimentos de abertura da junta no eixo “x”. Esse comportamento indica que o fechamento da comporta promove alterações nos esforços transmitidos ao pilar central, resultando em deslocamentos relativos entre os blocos de concreto monitorados.

De forma complementar, os eventos de abertura da comporta, representados pelas linhas tracejadas azuis, apresentam tendência oposta, com redução dos valores de deslocamento e retorno para condições mais negativas. Tal comportamento sugere uma recomposição do estado de esforços da estrutura após a diminuição das cargas ou da rigidez imposta pelo sistema de acionamento da comporta. A repetitividade desse padrão ao longo do período analisado demonstra coerência entre a resposta estrutural observada e a sequência operacional da estrutura hidráulica.

Já para o sensor instalado no eixo “y” as variações observadas devido a operação da comporta não apresentaram grande variações. Ao longo do período de 45 dias, para

o eixo “y” é possível observar variações de 0,05 milímetros no sentido de tração (valores positivos) e de compressão (valores negativos). No gráfico (Figura 8) é possível identificar alternância entre compressão e tração, refletindo uma resposta mais equilibrada às variações hidráulicas e térmicas.

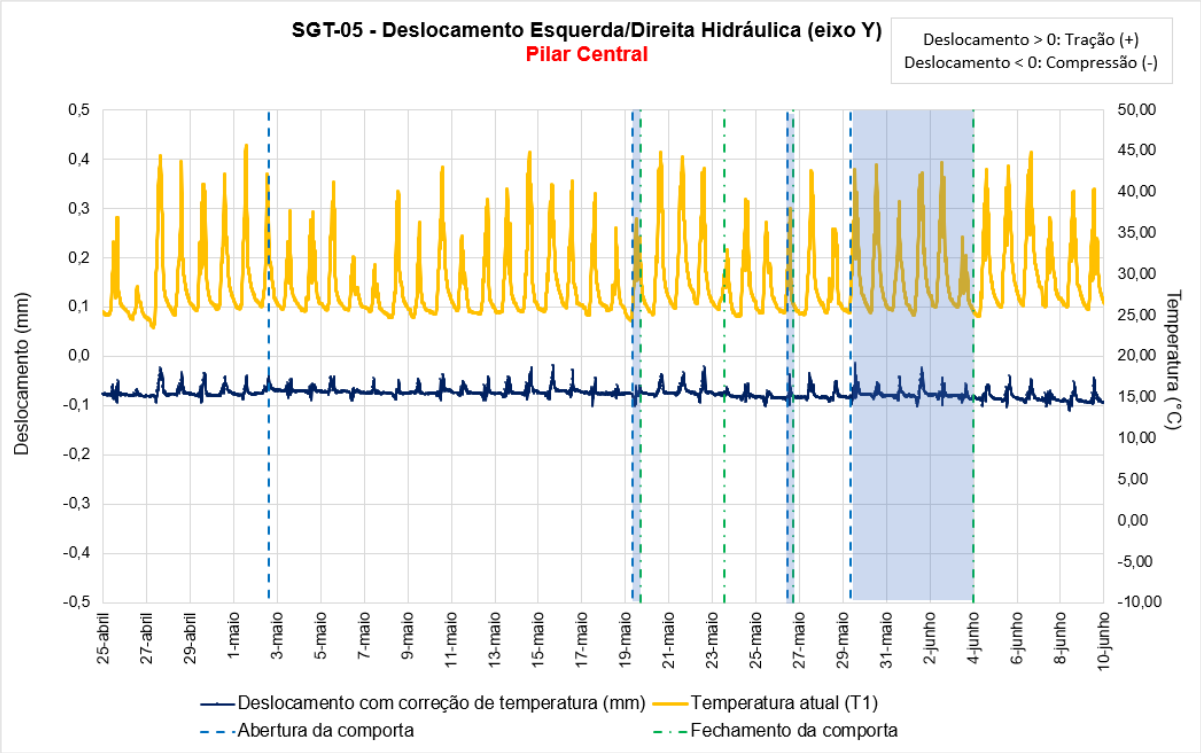


Figura 8 – Deslocamento calculado com correção de temperatura para o eixo “y” do sensor SGT-05.

No eixo “z”, os deslocamentos apresentam alternância entre valores positivos, associados ao recalque, e negativos, correspondentes a ascensão. Diferentemente do eixo “x”, onde predominam valores negativos (fechamento da junta), e do eixo “y”, que mostra alternância entre compressão e tração, o eixo Z reflete mais claramente os efeitos verticais das cargas hidráulicas sobre o pilar central.

A Figura 9 apresenta os dados obtidos, calculados com a correção de temperatura para o eixo “z” do sensor SGT-05. Ao longo do período de 45 dias, para o eixo “z” é possível observar variações de 0,08 milímetros no sentido de recalque (valores positivos) e de 0,13 milímetros no sentido de ascensão (valores negativos).

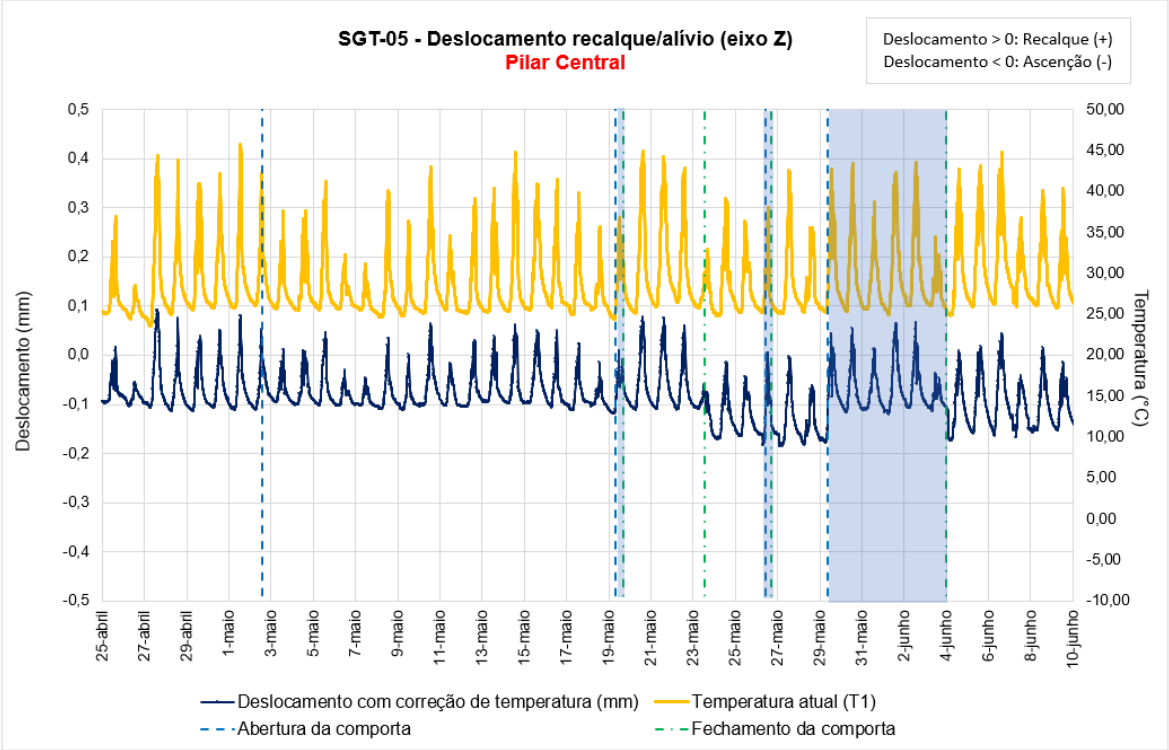


Figura 9 – Deslocamento calculado com correção de temperatura para o eixo “z” do sensor SGT-05.

Os eventos de fechamento da comporta, indicados pelas linhas tracejadas verdes, tendem a induzir deslocamentos positivos, caracterizando recalque. Já as aberturas da comporta, representadas pelas linhas tracejadas azuis, promovem deslocamentos negativos, associados ao alívio. Esse padrão confirma que a operação da comporta influencia diretamente o comportamento vertical da estrutura, redistribuindo esforços e provocando movimentos relativos no pilar.

Para os sensores do medidor triortogonal instalado no ponto SGT-05, observa-se influência térmica significativa sobre o comportamento do sistema, evidenciada pela variação cíclica diária da temperatura entre aproximadamente 25 °C e 45 °C. Embora os dados apresentados já contemplem correção térmica, pequenas oscilações residuais permanecem perceptíveis devido aos efeitos de dilatação térmica da estrutura de concreto e do próprio conjunto de instalação do sensor. Ainda assim, o instrumento apresentou estabilidade e repetibilidade adequadas, permitindo identificar a influência das manobras da comporta nos deslocamentos monitorados ao longo do período analisado.

3.1.2 Sensor SGT-07

O sensor SGT-07 está instalado no pilar da direita hidráulica para o monitoramento da estrutura. Ao longo do período de 45 dias, para o eixo “x” é possível observar variações de 0,06 milímetros no sentido de abertura (valores positivos) e no sentido de fechamento (valores negativos). A Figura 10 apresenta os dados obtidos, calculados com a correção de temperatura para o eixo “x” do sensor SGT-07.

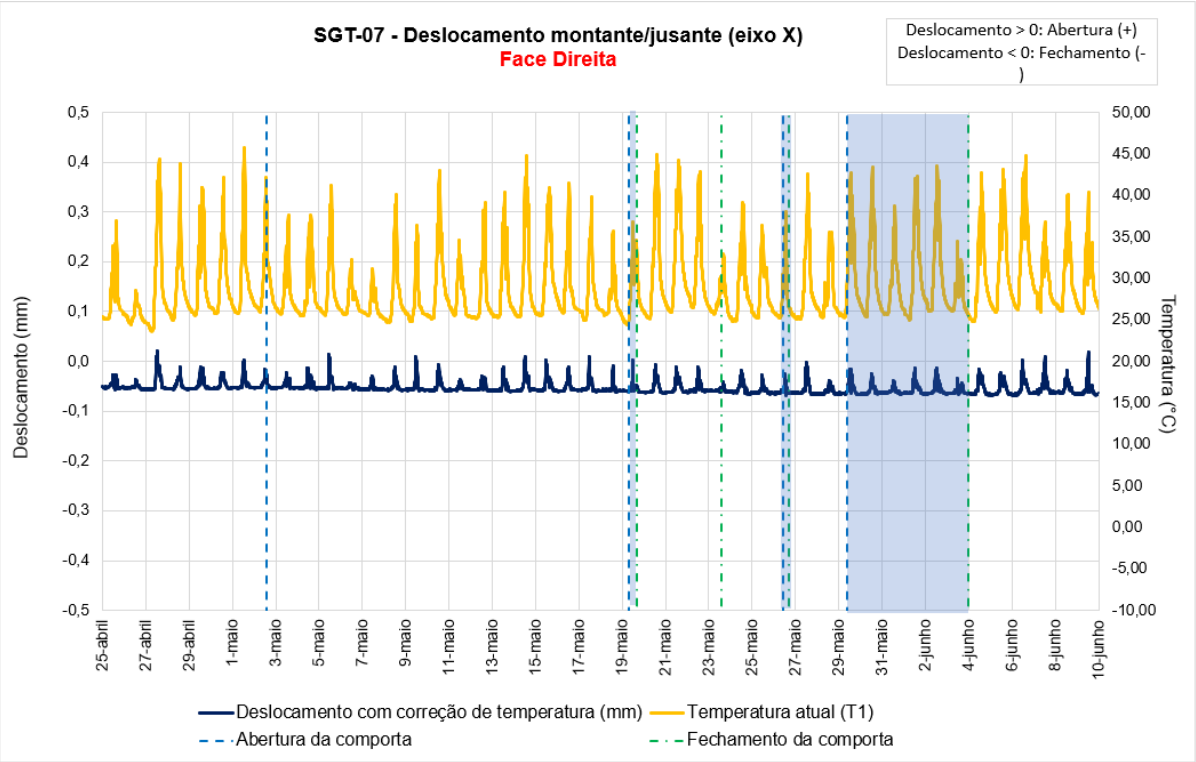


Figura 10 – Deslocamento calculado com correção de temperatura para o eixo “x” do sensor SGT-07.

O gráfico do sensor instalado no eixo “x” da face direita mostra que as variações de deslocamento são sutis ao longo do período monitorado. A curva azul, que representa os deslocamentos corrigidos pela temperatura, oscila discretamente entre valores positivos (abertura) e negativos (fechamento), sem apresentar movimentos abruptos ou instabilidades significativas.

Nos momentos de fechamento da comporta, indicados pelas linhas tracejadas verdes, há uma leve tendência de deslocamentos negativos, caracterizando fechamento relativo da junta estrutural. Já nos eventos de abertura da comporta, representados pelas linhas tracejadas azuis, observa-se deslocamentos ligeiramente positivos, associados à abertura da junta. Essas variações, embora pequenas, demonstram a coerência da resposta estrutural frente às manobras operacionais.

Os deslocamentos obtidos pelo sensor instalado no eixo “y” tiveram variações nos valores de 0,04 milímetros no sentido de tração (valores positivos) e valores de 0,03 milímetros no sentido de compressão (valores negativos). A Figura 11 apresenta os dados obtidos, calculados com a correção de temperatura para o eixo “y” do sensor SGT-07.

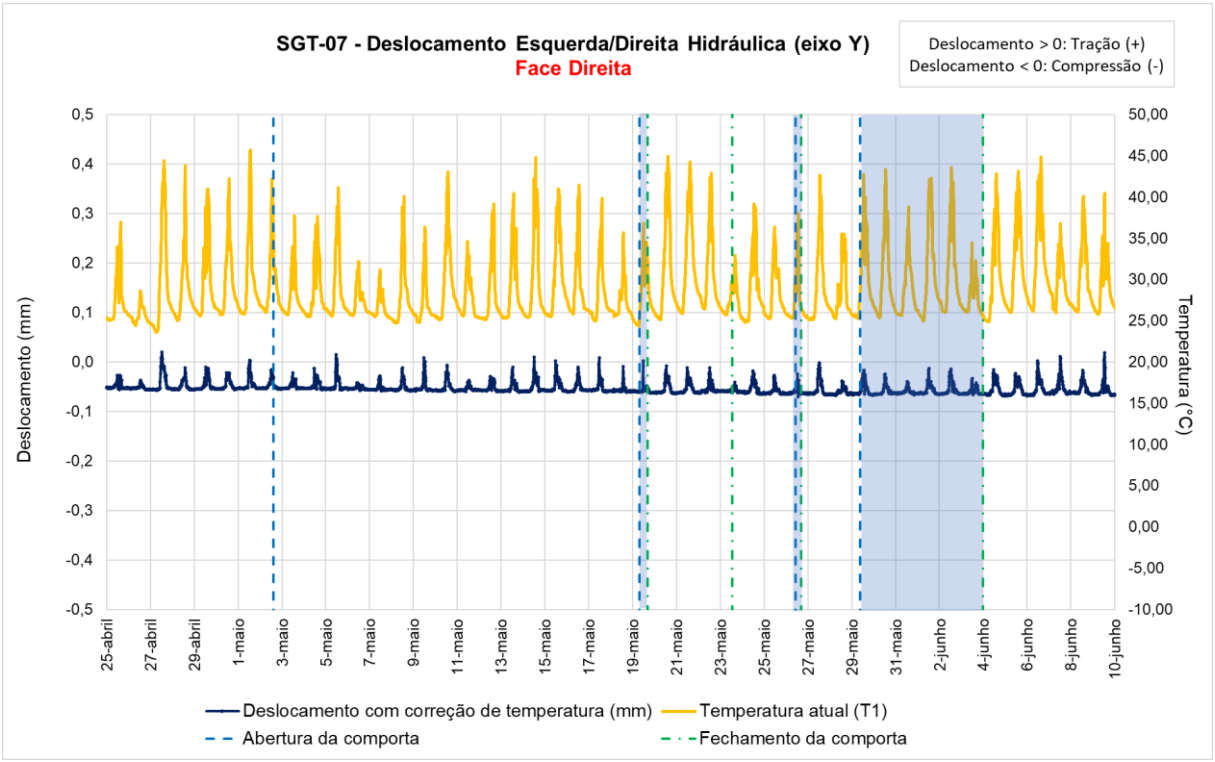


Figura 11 – Deslocamento calculado com correção de temperatura para o eixo “y” do sensor SGT-07.

Para o eixo “y” não foram identificadas correlações diretas com as manobras da comporta, sendo os deslocamentos registrados essencialmente associados às variações térmicas e às correções aplicadas.

De forma semelhante, os efeitos observados no eixo “z” do sensor SGT-07 também não apresentaram relação direta com a operação da comporta, indicando que os deslocamentos nesse eixo refletem predominantemente influências externas, como temperatura e condições estruturais locais, sem resposta significativa às manobras hidráulicas.

A Figura 12 apresenta os dados obtidos, calculados com a correção de temperatura para o eixo “z” do sensor SGT-07. Ao longo do período de 45 dias, para o eixo “z” é possível observar variações de 0,05 milímetros no sentido de recalque (valores positivos) e de 0,09 milímetros no sentido de ascensão (valores negativos).

Para os sensores instalados no SGT-07, a influência térmica é significativa, com ciclos diários variando entre aproximadamente 25 °C e 45 °C. Apesar da correção aplicada aos dados, pequenas oscilações residuais permanecem perceptíveis, atribuídas à dilatação térmica do concreto e do conjunto de instalação. Ainda assim, os sensores apresentaram estabilidade e repetitividade adequadas, permitindo identificar com clareza os efeitos das manobras da comporta sobre os deslocamentos monitorados ao longo do período analisado.

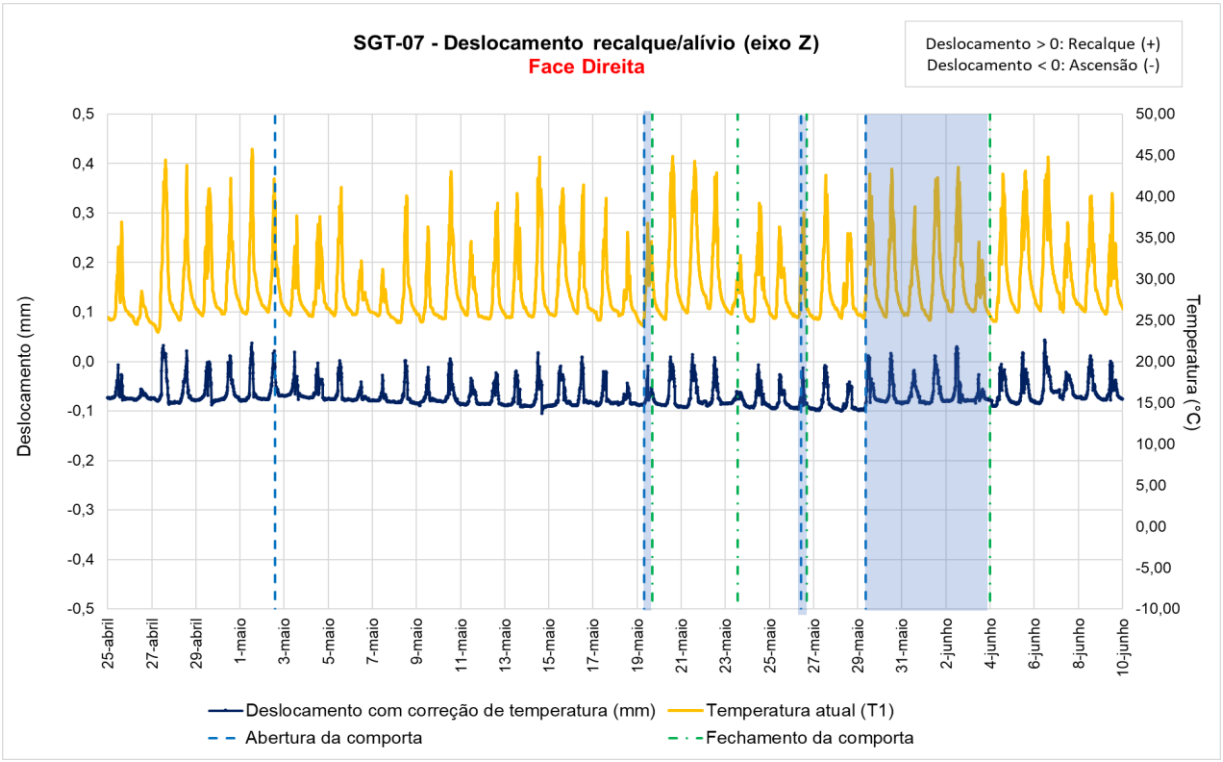


Figura 12 – Deslocamento calculado com correção de temperatura para o eixo “z” do sensor SGT-07.

3.2 Strain Gauge

Os sensores modelos 4000 da fabricante Geokon, instalados nas faces laterais dos pilares, monitoram as deformações de tração e compressão na parte inferior da viga. A relação entre a frequência e deformação de uma corda vibrante se dá pela seguinte equação:

$$f = \frac{1}{2L_w}\sqrt{\frac{F}{m}} \tag{5}$$

Onde:

f = frequência natural (s^{-1});

L_w = comprimento de corda vibrante (in);

F = tensão na corda vibrante (lb);

m = massa da corda por unidade de comprimento ($lb/s^2/in^2$).

Considerando as propriedades geométricas e mecânicas específicas da corda vibrante utilizada no sensor modelo 4000, a equação pode ser simplificada, permitindo a conversão direta da frequência medida em deformação específica, conforme apresentado a seguir [4]:

$$\varepsilon = 4{,}062 \times 10^{-3} f^2 \tag{6}$$

Onde:

ε = tensão na superfície do corpo ao qual o sensor está fixado (με);

f = frequência medida pelo sensor (Hz).

Para o monitoramento do comportamento da instrumentação e interpretação dos dados obtidos, adota-se a seguinte convenção de sinais:

- Deformação > 0: indica solicitação de tração (+);
- Deformação < 0: indica solicitação de compressão (-).

Para a interpretação do sensor no concreto, as leituras obtidas são influenciadas tanto pelas variações de carga quanto pelas deformações decorrentes das mudanças de temperatura. Dessa forma, torna-se necessária a aplicação de uma correção térmica para separar a parcela de deformação causada exclusivamente pela expansão ou contração térmica do concreto daquela provocada pelas ações mecânicas. Essa correção considera a diferença entre os coeficientes de expansão térmica do aço (material do sensor) e do concreto, bem como a variação de temperatura registrada durante o período de monitoramento. Assim, a deformação corrigida representa, de forma mais precisa, o comportamento estrutural do elemento de concreto sob carregamento, minimizando a influência das variações térmicas nas medições.

Para tal, foi considerada a seguinte equação:

$$\mu\varepsilon_{carga} = \mu\varepsilon_{real} - \mu\varepsilon_{térmica} = (R_1 - R_0)\,B + (T_1 - T_0) \times (CF_1 - CF_2) \qquad (7)$$

Em que:

CF_1 = coeficiente de expansão térmica do aço com valor nominal de 12,2 (με/ºC);

CF_2 = coeficiente de expansão térmica do concreto com valor nominal de 10,4 (με/ºC).

3.2.1 Sensor SG-06

O sensor SG-06, instalado na face interna direita do pilar central, apresenta correlação direta com a operação da comporta VS-01, comportamento esperado em função das alterações de carregamento impostas à estrutura durante os ciclos de abertura e fechamento.

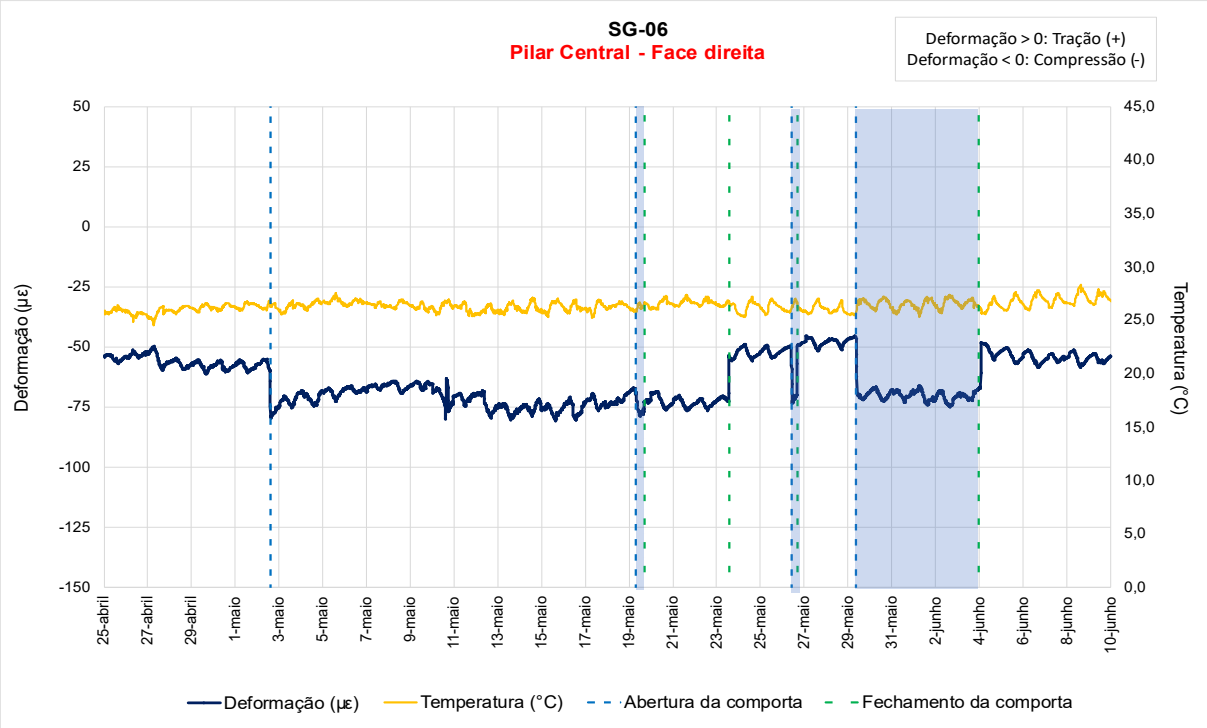


Figura 13 – Deformação calculada com correção de temperatura para o sensor SG-06.

Conforme na Figura 13, ao longo do período de monitoramento analisado, observa-se variação significativa das deformações em resposta às movimentações das comportas, evidenciando a influência operacional no comportamento estrutural da viga munhão e do pilar. As maiores variações registradas durante o mês de maio, conforme indicado no gráfico, estão associadas a movimentações da comporta superiores a 5.000 mm, tanto em operações de abertura quanto de fechamento. Já as demais oscilações observadas correspondem a diferenças operacionais de abertura e fechamento com variações da ordem de 100 a 3.000 mm.

Verifica-se ainda que os eventos de abertura da comporta estão associados ao aumento das deformações compressivas registradas pelo sensor, enquanto os eventos de fechamento apresentam comportamento relacionado à redução da compressão e tendência à tração. Tal resposta indica a redistribuição dos esforços estruturais no conjunto durante as diferentes condições operacionais do vertedouro.

3.2.2 Sensor SG-08

O sensor SG-08, instalado no pilar central também demonstra a influência da operação da comporta VS-01 na leitura do sensor. Ao longo do período analisado, apresentado na Figura 14, observou-se uma redução gradual e incremental dos valores de deformação, atingindo o valor mínimo de -125 με, o que indica a predominância de esforços compressivos atuando na região instrumentada.

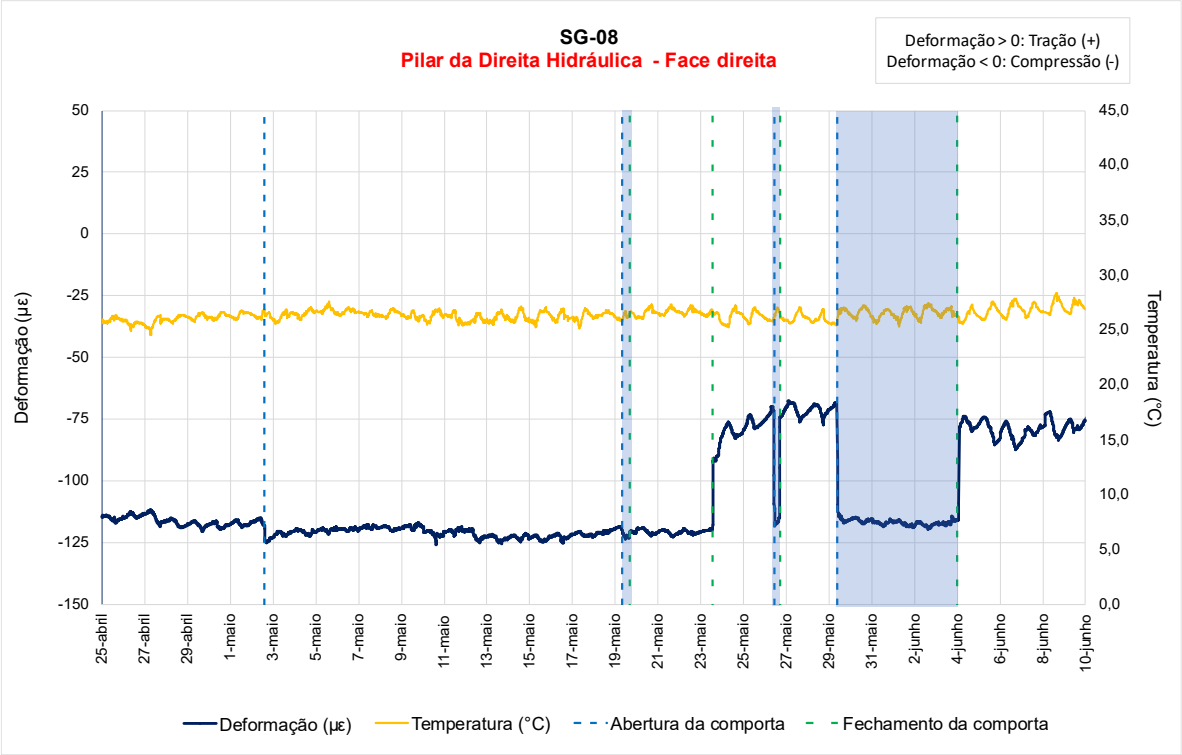


Figura 14 – Deformação calculada com correção de temperatura para o sensor SG-08.

O comportamento observado para o SG-08 apresenta forte correlação com o monitoramento do sensor SG-06, instalado na interface lateral do pilar central, na face direita da estrutura. Em ambos os instrumentos, as variações registradas demonstram

tendências semelhantes em resposta às operações de abertura e fechamento da comporta VS-01, evidenciando a influência das alterações de carregamento hidráulico e estrutural induzidas pela operação da comporta.

4. CONCLUSÕES

Os resultados do monitoramento evidenciaram que os sensores instalados nas vigas munhão apresentaram respostas coerentes com as condições operacionais do vertedouro, permitindo identificar a influência direta das manobras de abertura e fechamento da comporta sobre o comportamento estrutural da região instrumentada.

Os medidores triortogonais possibilitaram avaliar os deslocamentos relativos entre a viga e o pilar nos eixos “x”, “y” e “z”. A resposta mais representativa foi observada no eixo “x”, associado à abertura e ao fechamento da junta. No pilar central, o fechamento da comporta produziu deslocamentos positivos, indicando abertura relativa da junta, enquanto a abertura da comporta resultou em deslocamentos negativos, relacionados ao fechamento relativo entre os elementos estruturais. Nos demais eixos, foram registradas variações de menor amplitude e com maior influência das oscilações térmicas.

Os *strain gauges* de corda vibrante apresentaram deformações predominantemente compressivas, compatíveis com as alterações de carregamento decorrentes da operação da comporta. Em particular, os sensores SG-06 e SG-08 exibiram tendências semelhantes, demonstrando coerência, repetibilidade e consistência na resposta estrutural medida.

De forma geral, a instrumentação apresentou desempenho satisfatório e permitiu o acompanhamento contínuo dos deslocamentos e das deformações nas vigas munhão. A utilização conjunta de medidores triortogonais e strain gauges de corda vibrante, associada à análise e à correção dos efeitos térmicos, mostrou-se adequada para distinguir as respostas estruturais relacionadas às condições operacionais. A metodologia empregada pode ser aplicada a outras estruturas hidráulicas, contribuindo para o aprimoramento do monitoramento, da avaliação de desempenho e da gestão da segurança de barragens.

5. PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento, *Strain Gauge*, Medidor Triortogonal, Vigas Munhão, Comportamento Estrutural.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] DEPARTMENT OF ARMY (2000) - *“*Engineering and Design: Design of Spillway Tainter Gates*”,* Engineer Manual EM 1110-2-2702*,* Washington, DC*.*

[2] DUNCLIFF, J. (1988) – “Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance”, New York: Wiley & Sons, 577P.

[3] GEOKON (2024) – “Model 4420: Vibrating Wire Crackmeter – Instruction Manual”,

Lebanon, NH. Revision X.4.

[4] GEOKON (2024) – “Model 4000 Series (4050 included): Vibrating Wire Strain Gauges – Instruction Manual”, Lebanon, NH. Revisão GG.2.

	**Pamela Vargas DANILISZYN** Engenheira Civil com 5 anos de experiência em instrumentação geotécnica convencional e automatizada, atuando em projetos de implantação, inspeções de segurança e análise de dados em empreendimentos hidrelétricos, infraestrutura e mineração. Graduada pela PUC-PR, mestranda em Engenharia Geotécnica pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e MBA em Gestão de Projetos pela IPOG.
	**Stella Almeida Fernandes BRITO** Engenheira Civil com 7 anos de experiência em segurança de barragens, instrumentação geotécnica convencional e automatizada, inspeções de segurança e análise de dados em empreendimentos hidrelétricos e mineração. Graduada pelo IFMG, pós-graduanda em Geotecnia pela PUC Minas e em Automação e Controle de Processos pela UFV.
	**Wilson SOARES Junior** Engenheiro Civil pela UFPR, especialista em instrumentação e monitoramento e automação de estruturas geotécnicas com 25 anos de experiência, em projetos de infraestrutura, hidrogeração e mineração.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.2
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

INTEGRAÇÃO ENTRE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS E SISTEMAS DE ATERRAMENTO NA INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA DE BARRAGENS DE CONCRETO

Rodrigo RAFFAELLI YAGNYCZ
Engenheiro Eletricista - G5 Engenharia

Lucas TOKARSKI LIMA
Engenheiro Eletricista - G5 Engenharia

Cícero José ALBERTON

Engenheiro Eletricista – G5 Engenharia

Wilson SOARES JUNIOR

Engenheiro Civil – G5 Engenharia

RESUMO

A instrumentação geotécnica é um dos principais pilares da segurança operacional de barragens de concreto, permitindo o acompanhamento contínuo do comportamento estrutural, hidráulico e térmico ao longo da vida útil da estrutura. A crescente utilização de sensores eletrônicos, sistemas automatizados de aquisição de dados e telemetria ampliou, entretanto, a exposição desses sistemas a surtos elétricos transitórios, associados a descargas atmosféricas, manobras eletromecânicas e à elevação do potencial de terra. Mesmo em ambientes internos, como galerias de inspeção e casas de instrumentação, barragens de concreto estão sujeitas a acoplamentos eletromagnéticos e a diferenças de potencial ao longo de extensas malhas de aterramento estrutural. Nesses cenários, a aplicação de dispositivos de proteção contra surtos apresenta-se como medida técnica relevante para a preservação da integridade dos instrumentos, dos sistemas de aquisição e da confiabilidade dos dados de monitoramento. Este trabalho aborda a utilização de DPS em sistemas de monitoramento geotécnico de barragens de concreto, destacando a relação indissociável entre a eficácia desses dispositivos e a correta concepção do sistema de aterramento e equipotencialização da barragem. Ressalta-se que a simples adoção de DPS, sem integração adequada ao sistema de aterramento da estrutura, pode resultar em proteção ineficaz ou até em agravamento dos efeitos dos surtos. Assim, o trabalho reforça a necessidade de uma abordagem multidisciplinar, integrando engenharia geotécnica e elétrica, como elemento fundamental para a confiabilidade do monitoramento e para a segurança global de barragens de concreto.

ABSTRACT

Geotechnical instrumentation is one of the main pillars of the operational safety of concrete dams, enabling continuous monitoring of structural, hydraulic and thermal behavior throughout the service life of the structure. The increasing use of electronic sensors, automated data acquisition systems and telemetry has also increased the exposure of these systems to transient electrical surges associated with lightning, electromechanical switching and ground potential rise. Even in internal environments, such as inspection galleries and instrumentation rooms, concrete dams may be subject to electromagnetic coupling and potential differences along extensive structural grounding systems. In this context, the application of surge protective devices is presented as a relevant technical measure to preserve the integrity of instruments, acquisition systems and monitoring data reliability. This paper discusses the use of SPDs in geotechnical monitoring systems of concrete dams, emphasizing the close relationship between the effectiveness of these devices and the proper design of the grounding and equipotential bonding system. It is highlighted that the simple adoption of SPDs, without adequate integration with the grounding system, may result in ineffective protection or even worsen the effects of transient surges. Therefore, the paper reinforces the need for a multidisciplinary approach, integrating geotechnical and electrical engineering as a fundamental requirement for monitoring reliability and global dam safety.

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens de concreto depende de um conjunto integrado de ações de projeto, construção, operação, inspeção e monitoramento [1]. Entre esses elementos, a instrumentação geotécnica ocupa posição estratégica, pois fornece dados objetivos para acompanhamento do comportamento da estrutura e de sua fundação ao longo do tempo. Medições de pressões, deslocamentos, deformações, temperaturas, vazões de drenagem e abertura de juntas permitem avaliar tendências, identificar anomalias e subsidiar decisões de operação e manutenção.

Em barragens de concreto, a instrumentação automatizada é usualmente composta por sensores instalados no maciço, na fundação, em juntas estruturais, em galerias internas e em pontos específicos de controle hidráulico e estrutural. Esses instrumentos instalados são interligados por cabos de sinal a caixas de junção, painéis de aquisição, multiplexadores, dataloggers e sistemas de comunicação, formando uma arquitetura distribuída de monitoramento. A Figura 1 apresenta, de forma esquemática a interação entre sensores, cabos, painéis, sistemas de aquisição e telemetria.

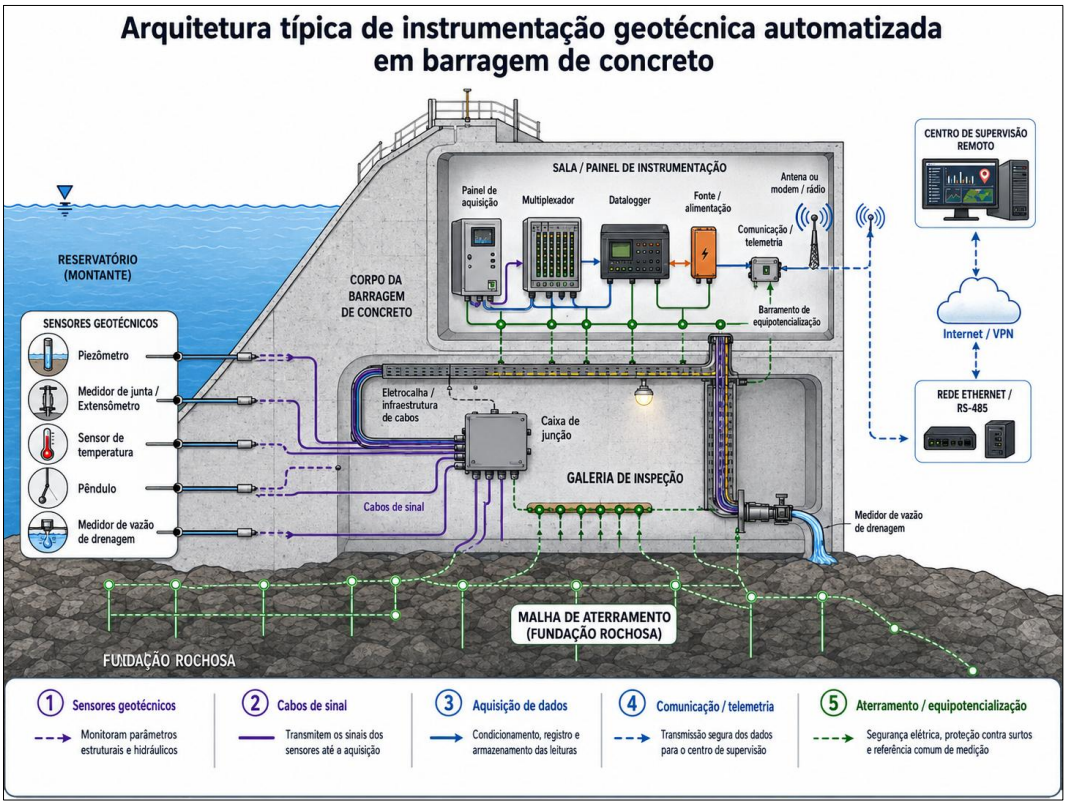


Figura 1 – Arquitetura típica de instrumentação geotécnica automatizada em barragem de concreto.

Nas últimas décadas, a instrumentação de barragens passou por um processo relevante de modernização. Sistemas originalmente baseados em leituras manuais passaram a ser complementados ou substituídos por sensores eletrônicos, dataloggers, multiplexadores, painéis de aquisição, redes de comunicação e sistemas de telemetria. Essa evolução ampliou a frequência de leitura e a capacidade de análise de dados, favorecendo o monitoramento remoto e a tomada de decisão mais rápida.

Entretanto, também introduziu maior dependência de equipamentos eletrônicos sensíveis e de infraestrutura elétrica associada.

Em barragens de concreto, parte significativa dos instrumentos está instalada em ambientes internos, como galerias de inspeção, galerias de drenagem, salas técnicas e caixas de instrumentação. À primeira vista, esses locais podem sugerir menor exposição a descargas atmosféricas e perturbações externas. Contudo, a presença de cabos extensos, eletrocalhas, estruturas metálicas, tubulações, armaduras, sistemas de aterramento, alimentação elétrica e comunicação cria caminhos potenciais para a propagação de surtos transitórios e diferenças de potencial.

Esses surtos podem ter origem em descargas atmosféricas diretas ou indiretas, manobras eletromecânicas, acoplamentos indutivos e capacitivos, elevação do potencial de terra e transitórios conduzidos por linhas de alimentação, sinal ou comunicação. Mesmo quando a descarga não incide diretamente sobre a barragem, correntes impulsivas e campos eletromagnéticos associados podem induzir sobretensões em cabos longos ou provocar diferenças de potencial entre pontos distintos da estrutura. A Figura 2 ilustra os principais caminhos de entrada e propagação de surtos elétricos em sistemas de instrumentação de barragens de concreto.

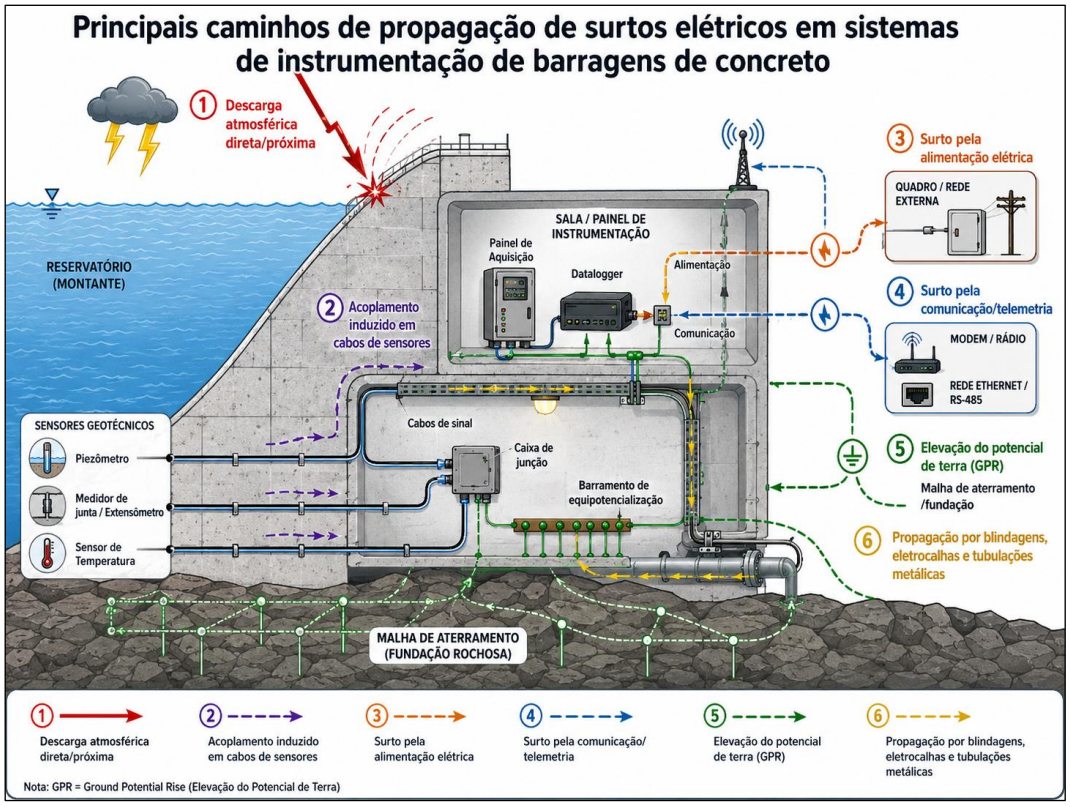


Figura 2 – Principais caminhos de propagação de surtos elétricos em sistemas de instrumentação de barragens de concreto.

Os dispositivos de proteção contra surtos (DPS) são aplicados para limitar sobretensões transitórias e conduzir correntes impulsivas para um sistema de referência adequado. Em sistemas de instrumentação geotécnica, sua aplicação

requer atenção especial, pois os sinais de medição possuem baixa amplitude, os sensores podem ter elevada sensibilidade elétrica e muitos instrumentos são de difícil substituição após a concretagem ou instalação em fundação. A falha de um sensor ou datalogger não representa apenas um custo de manutenção, mas pode comprometer a continuidade de séries históricas e a confiabilidade da avaliação de segurança.

Entretanto, a simples instalação de DPS não garante, por si só, a proteção adequada dos sistemas de monitoramento. A eficácia desses dispositivos depende diretamente da existência de um sistema de aterramento e equipotencialização capaz de oferecer um caminho de baixa impedância para as correntes transitórias. Quando o DPS é instalado sem adequada conexão ao barramento de equipotencialização, ou quando há aterramentos isolados, condutores longos, blindagens mal conectadas ou diferenças de potencial não controladas, a proteção pode se tornar ineficaz ou até transferir o problema para outros pontos do sistema. A Figura 3 apresenta a integração funcional entre DPS, blindagem de cabos, barramento de equipotencialização e sistema de aterramento.

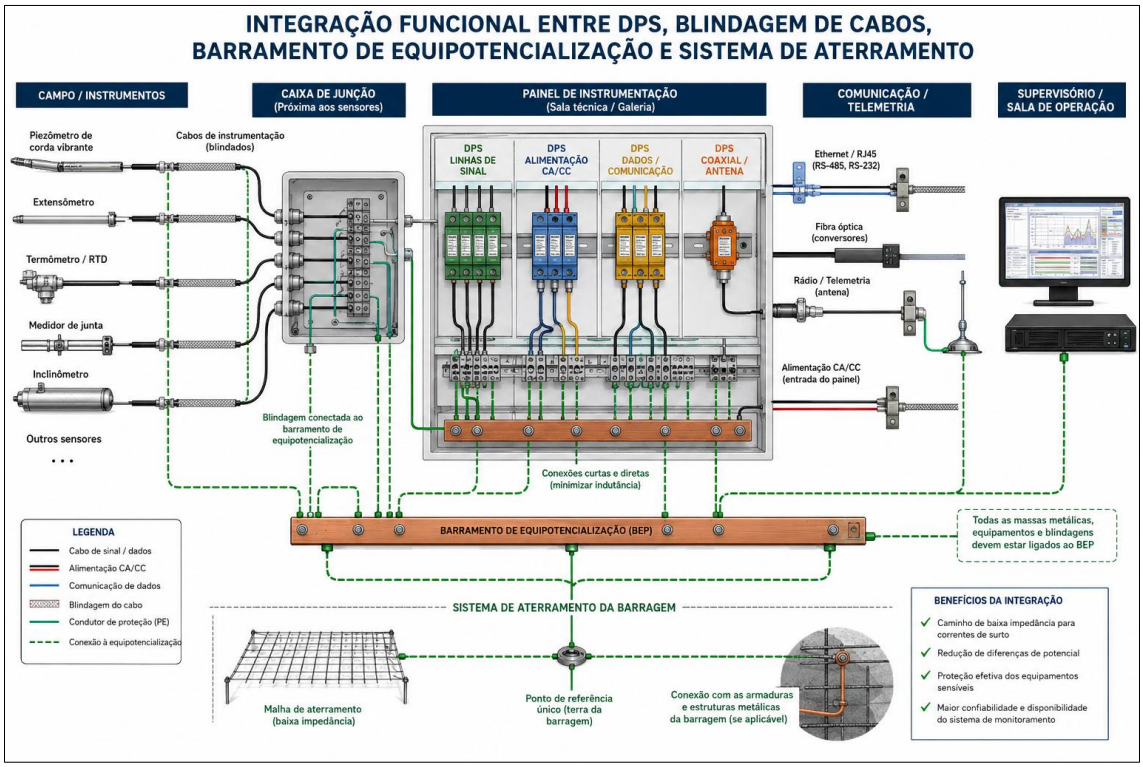


Figura 3 – Integração funcional entre DPS, blindagem de cabos, barramento de equipotencialização e sistema de aterramento.

A análise da vulnerabilidade da instrumentação geotécnica deve considerar os diferentes subsistemas que compõem o monitoramento automatizado. Linhas de alimentação elétrica, cabos de sinal de sensores, redes de comunicação, antenas, blindagens, caixas de junção e painéis de aquisição possuem comportamentos distintos diante de surtos transitórios. Por esse motivo, a proteção deve ser definida conforme o tipo de linha protegida, a suportabilidade dos equipamentos, a sensibilidade dos sinais, a forma de instalação e a disponibilidade de aterramento

funcional. A Tabela 1 sintetiza exemplos de vulnerabilidades e medidas de proteção aplicáveis aos principais subsistemas de instrumentação.

Tabela 1 – Vulnerabilidade e medidas de proteção aplicáveis a subsistemas de instrumentação geotécnica.

Subsistema	Exemplos de aplicação	Principal vulnerabilidade	Medidas de proteção recomendadas	Relação com aterramento ou equipotencialização
Alimentação elétrica dos painéis	Quadros CA/CC, fontes, nobreaks, carregadores, painéis solares e bancos de baterias	Surtos conduzidos pela rede elétrica, manobras de cargas, elevação de potencial de terra e transitórios provenientes de equipamentos auxiliares	Aplicar DPS adequado à tensão do circuito, em corrente alternada ou contínua, preferencialmente coordenado com a proteção a montante. Proteger também fontes, carregadores e entradas dos painéis de instrumentação	O DPS deve ser conectado ao barramento de equipotencialização do painel por condutor curto, direto e de baixa impedância, interligado ao sistema de aterramento da barragem
Linhas de sinal de sensores geotécnicos	Piezômetros de corda vibrante, extensômetros, medidores de junta, termômetros, RTDs, strain gauges e células de carga	Sobretensões induzidas em cabos longos, ruído eletromagnético, danos às entradas dos dataloggers e perda de confiabilidade das leituras	Utilizar DPS específico para instrumentação, compatível com o tipo de sinal, tensão nominal, frequência de medição e sensibilidade do sensor. Avaliar proteção linha-linha e linha-terra	A proteção deve possuir referência funcional ao barramento de equipotencialização. A conexão inadequada ao terra pode tornar o DPS ineficaz ou introduzir ruído nas medições
Caixas de junção e terminais de campo	Caixas próximas aos instrumentos, caixas intermediárias, bornes de transição e pontos de agrupamento de cabos	Concentração de cabos sujeitos a surtos induzidos, falha de isolamento, entrada de umidade e transferência de sobretensão para cabos multipares	Prever proteção contra surtos nos pontos de transição, bornes adequados, invólucros com grau de proteção compatível e identificação dos circuitos protegidos	A caixa deve ser equipotencializada, com conexão das partes metálicas, blindagens e DPS ao barramento de terra local ou ao condutor de proteção previsto
Dataloggers e multiplexadores	Unidades de aquisição de dados, módulos de expansão, multiplexadores e entradas analógicas/digitais	Queima de canais de entrada, falha de comunicação, travamento do sistema, perda de dados e interrupção da série histórica	Proteger todas as interfaces conectadas ao equipamento: alimentação, sinais de sensores e comunicação. Aplicar DPS em cascata quando houver cabos longos ou equipamentos externos	O painel do datalogger deve possuir barramento de equipotencialização próprio, conectado ao aterramento da barragem, evitando diferenças de potencial entre entradas distintas
Comunicação cabeada	Ethernet, RS-485, RS-232, Modbus, fibra óptica com conversores metálicos e redes internas	Surtos conduzidos ou induzidos em cabos metálicos, diferença de potencial entre equipamentos interligados e dano a portas de comunicação	Aplicar DPS específico para dados, compatível com protocolo, velocidade e tensão de operação. Sempre que possível, utilizar fibra óptica para reduzir caminhos metálicos de propagação	Os equipamentos de comunicação devem estar equipotencializados. Conversores, switches e gateways devem compartilhar referência de terra adequada
Telemetria e antenas	Rádio, LoRa, modem celular, antenas externas, mastros, cabos coaxiais e gateways	Entrada de surtos por estruturas externas expostas, cabos coaxiais e mastros metálicos, com transferência para o painel de instrumentação	Utilizar DPS coaxial ou proteção específica para RF, instalar proteção no ponto de entrada do cabo e aterrar mastros, suportes e blindagens metálicas	A antena, o mastro, o DPS coaxial e o painel devem estar integrados ao mesmo sistema de equipotencialização, evitando diferença de potencial entre o sistema externo e o painel
Blindagem de cabos	Cabos instrumentados, cabos multipares, cabos de sensores e cabos de comunicação	Captação de ruído eletromagnético, circulação de correntes pela blindagem e transferência de surtos para equipamentos sensíveis	Definir critério de aterramento da blindagem conforme arquitetura do sistema, evitando conexões aleatórias em múltiplos pontos sem controle técnico	A blindagem deve ser conectada ao barramento de equipotencialização conforme critério de projeto. Em geral, deve-se evitar que a blindagem atue como caminho principal de corrente impulsiva

Subsistema	Exemplos de aplicação	Principal vulnerabilidade	Medidas de proteção recomendadas	Relação com aterramento ou equipotencialização
Eletrocalhas, eletrodutos e estruturas metálicas	Infraestrutura de cabos em galerias, suportes, leitos, tubulações metálicas e quadros	Diferenças de potencial entre massas metálicas, acoplamento com cabos de instrumentação e propagação de surtos pela infraestrutura	Equipotencializar estruturas metálicas, separar rotas de potência e instrumentação e evitar compartilhamento inadequado de infraestrutura com cargas ruidosas	Todas as massas metálicas acessíveis devem ser interligadas ao sistema de equipotencialização, reduzindo tensões de toque e diferenças de potencial locais
Sistemas alimentados por bateria ou fonte isolada	Dataloggers autônomos, painéis solares, baterias, estações remotas e sistemas independentes	Falsa percepção de imunidade a surtos; indução em cabos de sensores, antenas ou estruturas metálicas conectadas	Avaliar todos os caminhos metálicos conectados ao sistema. Aplicar DPS em sensores, comunicação e antenas quando houver exposição a surtos induzidos ou conduzidos	Mesmo sistemas isolados podem exigir referência funcional à terra para atuação dos DPS, blindagens, antenas ou estruturas metálicas associadas
Supervisório e sala de operação	Servidores, computadores, switches, modems, sistemas SCADA e banco de dados	Perda de comunicação, dano a equipamentos de rede, falhas de registro e interrupção da transmissão de dados	Aplicar proteção em alimentação elétrica e redes de dados. Prever nobreak, DPS coordenado e proteção nas interfaces vindas de campo	A sala de operação deve possuir barramento de equipotencialização interligado ao sistema de aterramento, evitando diferença de potencial com os painéis de campo

O objetivo deste artigo é discutir a aplicação de DPS em sistemas de instrumentação geotécnica de barragens de concreto, com ênfase na necessidade de integração desses dispositivos aos sistemas de aterramento, equipotencialização e SPDA. Busca-se demonstrar que a proteção contra surtos não deve ser tratada como um componente isolado, mas como parte da arquitetura de confiabilidade do monitoramento de barragens. Nesse contexto, a abordagem proposta integra conceitos de segurança de barragens, instrumentação geotécnica e engenharia elétrica, contribuindo para a preservação dos equipamentos, continuidade das séries históricas e confiabilidade das informações utilizadas na tomada de decisão operacional.

2. INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA EM BARRAGENS DE CONCRETO

Barragens de concreto são usualmente monitoradas por um conjunto de instrumentos destinados a avaliar o comportamento da estrutura, da fundação e das interfaces entre blocos, juntas, galerias e maciço rochoso [3]. Entre os instrumentos mais recorrentes encontram-se piezômetros, extensômetros, medidores de junta, termômetros, pêndulos diretos e invertidos, strain gauges, células de carga, medidores de vazão e dispositivos de leitura de deslocamentos. A seleção desses instrumentos depende do tipo de barragem, das hipóteses de projeto, das condições geológicas e dos modos de falha considerados relevantes.

O monitoramento por instrumentação está associado à observação de variáveis de comportamento que não podem ser avaliadas adequadamente apenas por inspeção visual. Pressões internas e de fundação, variações térmicas, deslocamentos relativos e deformações são parâmetros essenciais para a avaliação de estabilidade, estanqueidade, integridade estrutural e desempenho hidráulico. Em sistemas automatizados, esses instrumentos são conectados a caixas de junção,

multiplexadores e dataloggers, permitindo leituras programadas e transmissão dos dados para centros de controle ou plataformas de supervisão.

A arquitetura física desses sistemas frequentemente envolve trechos longos de cabos instalados em galerias, shafts, eletrodutos, eletrocalhas e canaletas. Em barragens de concreto, os cabos podem percorrer grandes distâncias entre o ponto de instalação do sensor e o painel de aquisição. Quanto maior essa extensão, maior a possibilidade de acoplamento eletromagnético e de exposição a diferenças de potencial entre pontos distintos da estrutura.

Outro aspecto relevante é a coexistência da instrumentação com sistemas eletromecânicos e elétricos da usina ou da barragem. Painéis auxiliares, bombas de drenagem, iluminação, tomadas, comunicação, automação, comportas, sensores ambientais e sistemas de segurança podem compartilhar ambientes internos ou rotas próximas. Dessa forma, a instrumentação geotécnica deve ser compreendida como um sistema instalado dentro de uma infraestrutura eletromecânica complexa, e não como um conjunto isolado de sensores.

Essa condição impõe a necessidade de critérios específicos de instalação. A confiabilidade da leitura depende não apenas da qualidade metrológica do instrumento, mas também da integridade do cabeamento, da blindagem, das conexões, da alimentação, da referência de terra, da proteção contra surtos e da manutenção periódica. Em barragens de concreto, nas quais alguns instrumentos podem ficar embutidos ou inacessíveis, a prevenção de danos elétricos deve ser incorporada desde a concepção do sistema de monitoramento.

3. SURTOS ELÉTRICOS E VULNERABILIDADE DA INSTRUMENTAÇÃO

Surtos elétricos são fenômenos transitórios caracterizados por elevações rápidas de tensão ou corrente, com duração reduzida, mas energia suficiente para danificar componentes eletrônicos ou degradar sua operação [4]. Em barragens de concreto, esses surtos podem ter origem em descargas atmosféricas diretas ou indiretas, manobras de equipamentos eletromecânicos, faltas em sistemas elétricos, comutação de cargas indutivas e elevação do potencial de terra.

As descargas atmosféricas podem afetar a instrumentação mesmo quando não atingem diretamente os sensores ou painéis. Uma descarga nas proximidades da estrutura pode induzir tensões em cabos longos de sinal, alimentação ou comunicação. Da mesma forma, uma descarga captada pelo SPDA ou por estruturas metálicas conectadas ao sistema de aterramento pode produzir correntes impulsivas e diferenças momentâneas de potencial entre partes da barragem.

A elevação do potencial de terra é particularmente relevante em estruturas de grande porte. Durante a dissipação de uma corrente impulsiva, pontos diferentes da malha de aterramento ou da estrutura equipotencializada podem apresentar potenciais distintos por um curto intervalo de tempo. Caso sensores, dataloggers, blindagens ou equipamentos de comunicação estejam conectados a referências diferentes, essas diferenças podem aparecer nos terminais dos instrumentos, nas entradas dos sistemas de aquisição ou nas interfaces de comunicação.

Além das descargas atmosféricas, a operação de equipamentos eletromecânicos pode produzir transitórios relevantes. Partidas e paradas de motores, manobras de painéis, acionamentos de bombas, comutação de transformadores, operação de comportas e falhas em circuitos auxiliares podem gerar sobretensões conduzidas pela alimentação elétrica ou acopladas aos circuitos de instrumentação. Em ambientes de usinas hidrelétricas, essa condição é especialmente importante devido à presença de sistemas de potência e automação próximos aos sistemas de monitoramento.

Os efeitos dos surtos sobre a instrumentação podem ser imediatos ou progressivos, conforme observado em estudos de caso de instrumentação de barragens [5]. Em casos severos, ocorre a queima de sensores, entradas analógicas, multiplexadores, fontes de alimentação, modems, switches ou dataloggers. Em situações menos evidentes, podem surgir leituras instáveis, ruídos intermitentes, deriva de medição, perda de comunicação, degradação de isolação e inconsistência em séries históricas. Esses efeitos podem dificultar a distinção entre uma anomalia real da barragem e uma falha do sistema de medição.

A vulnerabilidade é agravada pelo fato de que muitos sensores geotécnicos trabalham com sinais de baixa amplitude e alta sensibilidade. Instrumentos de corda vibrante, termômetros, strain gauges e transdutores podem ser afetados por perturbações elétricas que não seriam críticas para equipamentos de maior robustez. Por isso, a proteção contra surtos deve ser planejada de acordo com as características do sinal e com a suportabilidade elétrica dos equipamentos conectados.

4. SISTEMAS DE ATERRAMENTO, EQUIPOTENCIALIZAÇÃO E SPDA

O sistema de aterramento é a base funcional de qualquer estratégia de proteção contra surtos, conforme os princípios de proteção contra descargas atmosféricas e equipotencialização [6]. Em uma barragem de concreto, o aterramento pode envolver a malha principal da usina, condutores enterrados, armaduras, estruturas metálicas, tubulações, eletrocalhas, barramentos de equipotencialização, painéis elétricos e pontos de conexão em galerias. Sua finalidade não se limita à segurança contra choques elétricos: ele também fornece referência para equipamentos, caminho de escoamento para correntes de falta e percurso para correntes transitórias conduzidas por DPS.

A equipotencialização consiste na interligação intencional de massas metálicas e elementos condutivos para reduzir diferenças de potencial perigosas ou prejudiciais entre partes do sistema. Em galerias de barragens, essa medida é essencial porque sensores, painéis, cabos blindados, eletrocalhas e estruturas metálicas podem estar distribuídos em pontos distantes. Sem equipotencialização adequada, um surto pode encontrar caminhos indesejados através de equipamentos de aquisição ou linhas de sinal.

O SPDA tem como função interceptar descargas atmosféricas, conduzir a corrente por caminhos definidos e dissipá-la no sistema de aterramento [7]. Entretanto, o SPDA externo não elimina a necessidade de proteção interna. Mesmo quando a descarga é conduzida corretamente para a terra, parte dos efeitos eletromagnéticos pode aparecer em cabos, blindagens, alimentação ou comunicação. Por isso, a proteção

interna deve considerar DPS, roteamento de cabos, blindagem e integração com barramentos de equipotencialização.

Em sistemas de instrumentação, a relação entre DPS e aterramento é direta. O DPS atua criando um caminho preferencial para a corrente transitória quando a tensão ultrapassa determinado nível. Para que essa corrente seja desviada de forma segura, o dispositivo precisa estar conectado a uma referência de baixa impedância. Condutores longos, conexões deficientes, laços de terra, corrosão, seccionamentos indevidos ou aterramentos isolados podem elevar a tensão residual e reduzir significativamente a eficiência da proteção.

A discussão sobre sistemas isolados também merece atenção. A utilização de baterias, painéis solares ou comunicação sem fio pode reduzir alguns caminhos de condução de surtos pela alimentação ou por redes metálicas externas. Contudo, essa condição não elimina necessariamente a necessidade de aterramento funcional ou equipotencialização. Se houver cabos de sensores longos, blindagens, antenas, estruturas metálicas, painéis ou interfaces com outros sistemas, permanecerá a possibilidade de acoplamentos e diferenças de potencial. Portanto, a decisão sobre aterramento deve ser técnica e sistêmica, não baseada apenas na existência de alimentação isolada.

5. APLICAÇÃO DE DPS EM SISTEMAS DE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

A aplicação de DPS em sistemas de instrumentação geotécnica deve considerar a arquitetura completa do sistema de monitoramento e os requisitos aplicáveis a dispositivos de proteção contra surtos [8]. Não basta instalar um único dispositivo em um painel principal. A proteção deve abranger alimentação elétrica, linhas de sinal, comunicação, telemetria, blindagens e interfaces externas. Além disso, cada tipo de circuito possui características próprias de tensão, corrente, frequência, impedância e sensibilidade ao ruído.

Os DPS devem ser selecionados conforme a suportabilidade dos equipamentos protegidos e instalados de forma coordenada, respeitando a tensão nominal do circuito, o nível de proteção residual, a capacidade de condução de corrente, a tecnologia de proteção e a compatibilidade com o sinal. Em instrumentação geotécnica, é especialmente importante evitar que o dispositivo de proteção altere a medição, introduza capacitância excessiva, degrade o sinal ou gere caminhos permanentes de fuga.

5.1 DPS em linhas de alimentação elétrica

As linhas de alimentação elétrica de painéis de instrumentação, dataloggers, fontes, gateways, switches, carregadores de bateria, sistemas solares e nobreaks constituem um dos principais caminhos de entrada de surtos, devendo observar critérios de instalações elétricas de baixa tensão [9]. Quando esses equipamentos são alimentados a partir de circuitos CA da usina, devem ser previstos DPS nos quadros de origem e, quando aplicável, nos painéis locais de instrumentação. A coordenação entre dispositivos instalados em diferentes níveis reduz a energia residual que atinge os equipamentos sensíveis.

Em sistemas alimentados em corrente contínua, a proteção também deve ser considerada. Fontes CA/CC, bancos de baterias, controladores de carga e painéis solares podem ser afetados por surtos conduzidos ou induzidos. No caso de painéis solares instalados em áreas externas, o risco aumenta devido à exposição física e à extensão dos cabos. A proteção deve contemplar tanto o lado de entrada quanto o lado de saída, conforme a configuração do sistema.

A conexão do DPS ao barramento de terra do painel deve ser curta, direta e de baixa impedância. A utilização de condutores longos ou trajetos com curvas excessivas pode aumentar a tensão residual durante o surto. O barramento de terra do painel, por sua vez, deve estar integrado ao sistema de equipotencialização da barragem, evitando referências flutuantes ou isoladas que comprometam a atuação do dispositivo.

5.2 DPS em linhas de sinal de sensores geotécnicos

As linhas de sinal representam o ponto mais crítico da proteção de instrumentação geotécnica. Sensores como piezômetros de corda vibrante, extensômetros, strain gauges, termômetros e transdutores operam com sinais de baixa amplitude podem ser conectados por cabos longos até caixas de junção, multiplexadores ou dataloggers. Esses cabos podem captar surtos por indução eletromagnética ou conduzir diferenças de potencial entre o ponto de instalação do sensor e o painel de aquisição.

O DPS aplicado em linhas de sinal deve ser compatível com a natureza elétrica do instrumento. Deve-se verificar tensão nominal, nível de proteção, capacitância, resistência série, corrente de fuga e configuração de proteção entre condutores e entre condutor e terra. Um dispositivo inadequado pode interferir na leitura ou reduzir a precisão do sistema. Por isso, recomenda-se que a seleção seja feita com base nas especificações do fabricante do sensor e do sistema de aquisição.

A localização do DPS deve ser definida de acordo com a arquitetura do sistema. Em muitos casos, é recomendável instalar proteção próxima ao ponto de entrada do cabo no painel de aquisição, protegendo as entradas do datalogger ou multiplexador. Quando possível, proteções adicionais em caixas de junção ou próximo ao ponto de transição entre ambiente externo e interno podem reduzir a energia conduzida ao sistema. A decisão deve considerar acessibilidade, manutenção, custo, criticidade do instrumento e risco de exposição.

A blindagem dos cabos deve ser tratada em conjunto com a proteção contra surtos. Aterramentos incorretos de blindagem podem criar laços de terra ou permitir a circulação de correntes indesejadas. Por outro lado, blindagens desconectadas ou mal aterradas podem perder sua função de proteção eletromagnética. Em sistemas distribuídos, o critério de aterramento da blindagem deve ser definido de forma coordenada com o fabricante, com o sistema de aquisição e com o projeto de aterramento da barragem.

5.3 DPS em sistemas de comunicação e telemetria

Os sistemas de comunicação e telemetria são frequentemente negligenciados em projetos de proteção contra surtos, apesar de constituírem caminhos relevantes de entrada de transitórios. Redes Ethernet metálicas, RS-485, modems, rádios,

gateways, antenas, cabos coaxiais e conversores podem conectar o sistema de instrumentação a equipamentos externos, salas de controle, torres, áreas expostas ou redes de supervisão.

Interfaces de comunicação devem receber DPS compatíveis com o protocolo e com a taxa de transmissão. Em redes Ethernet, devem ser empregados dispositivos apropriados para dados, evitando prejuízo à comunicação. Em cabos coaxiais de antenas, a proteção deve considerar a frequência de operação, o tipo de conector, a impedância característica e a conexão ao sistema de aterramento. Para comunicação serial, deve-se observar a tensão de operação e a configuração dos pares de comunicação.

Em sistemas sem fio, como rádio, LoRa ou comunicação celular, a ausência de cabo metálico entre o ponto remoto e a central não elimina todos os riscos. Antenas externas, mastros, suportes metálicos, cabos coaxiais e fontes de alimentação podem introduzir surtos no equipamento de comunicação. Assim, a proteção deve ser avaliada no conjunto: antena, cabo, rádio, fonte, painel e aterramento local.

5.4 Coordenação entre DPS, aterramento e blindagem

A coordenação entre DPS, aterramento e blindagem é o elemento que diferencia uma proteção efetiva de uma simples instalação de dispositivos [10]. O DPS deve atuar antes que a tensão aplicada ao equipamento ultrapasse sua suportabilidade. Para isso, o nível de proteção residual deve ser compatível com os sensores, entradas de aquisição, fontes e interfaces de comunicação. Além disso, a energia do surto deve ser conduzida por um caminho de baixa impedância e não pelo equipamento protegido.

A proteção em cascata é recomendável quando há grande extensão de cabos ou múltiplas interfaces. Um primeiro nível de proteção pode ser instalado no ponto de entrada do sistema ou no quadro de alimentação, enquanto níveis adicionais protegem equipamentos sensíveis, como dataloggers e módulos de comunicação. Essa estratégia reduz a energia residual e melhora a confiabilidade global do sistema.

O roteamento físico dos cabos deve complementar a proteção elétrica. Cabos de potência e cabos de sinal devem, sempre que possível, ser separados. Cruzamentos devem ser feitos de forma adequada, e cabos de instrumentação devem evitar proximidade prolongada com alimentadores de motores, painéis de força ou circuitos de elevada corrente. Eletrocalhas metálicas, quando utilizadas, devem estar corretamente equipotencializadas e integradas ao sistema de aterramento.

Sistema isolado não deve ser interpretado como sistema imune a surtos. Mesmo quando a alimentação é realizada por bateria, painel solar ou fonte isolada, o conjunto sensor-cabo-painel-comunicação-estrutura pode permanecer exposto a acoplamentos eletromagnéticos, correntes de modo comum e diferenças de potencial. Nesses casos, o DPS somente terá atuação efetiva se houver uma referência de escoamento tecnicamente definida, compatível com a arquitetura de aterramento, blindagem e equipotencialização do sistema.

A manutenção dos DPS também deve ser incorporada ao plano de inspeção da instrumentação. Dispositivos submetidos a surtos podem perder capacidade de

proteção ou indicar fim de vida útil. A ausência de inspeção pode manter o sistema aparentemente protegido, mas sem efetiva capacidade de atuação. Assim, a documentação dos pontos de instalação, o registro dos modelos utilizados e a verificação periódica são partes essenciais da gestão de confiabilidade.

Tabela 2 – Diretrizes técnicas consolidadass para aplicação de DPS em sistemas de instrumentação geotécnica.

Subsistema	Risco principal	Medida recomendada	Relação com aterramento
Alimentação elétrica	Surtos conduzidos por circuitos CA ou CC, manobras e elevação de potencial de terra	Instalar DPS coordenado no quadro de origem e no painel local	Conectar ao barramento de terra por condutor curto e de baixa impedância
Linhas de sensores	Indução em cabos longos, sobretensão em sinais de baixa amplitude e diferença de potencial entre campo e painel	Aplicar DPS específico para instrumentação, compatível com sinal, tensão nominal, capacitância e corrente de fuga.	Referenciar ao barramento de equipotencialização do painel, evitando caminho de descarga pelo datalogger
Dataloggers e multiplexadores	Danos em entradas eletrônicas, travamento do sistema e perda de séries históricas	Proteger alimentação, entradas de sensores e comunicação associada, com proteção coordenada em cascata quando necessário.	Garantir referência comum entre equipamento, DPS, blindagens e painel.
Comunicação e telemetria	Entrada de surto por Ethernet, RS-485, rádio ou coaxial	Aplicar DPS específico para dados e antenas	Aterrar protetores e mastros conforme projeto de equipotencialização
Blindagens, eletrocalhas e estruturas metálicas	Ruído eletromagnético, correntes de modo comum e propagação de surtos pela infraestrutura metálica.	Definir critério de conexão das blindagens, separar potência e sinal e equipotencializar massas metálicas.	Evitar laços de terra, pontos flutuantes e uso da blindagem como caminho principal de corrente impulsiva.
Sistemas isolados ou autônomos	Falsa percepção de imunidade a surtos em sistemas com bateria, painel solar ou comunicação sem fio.	Avaliar cabos de sensores, antenas, estruturas, blindagens e interfaces externas antes de dispensar o aterramento funcional.	Definir referência de terra quando necessária para atuação do DPS e controle de diferenças de potencial.

6. CONCLUSÕES

A instrumentação geotécnica de barragens de concreto é essencial para a avaliação de segurança, mas sua confiabilidade depende da integridade dos sensores, cabos, painéis, sistemas de aquisição e comunicação. A modernização dos sistemas de monitoramento aumentou a capacidade de leitura e análise, porém também ampliou a exposição a fenômenos elétricos transitórios.

Os surtos elétricos podem atingir os sistemas de instrumentação por diferentes caminhos, incluindo alimentação elétrica, linhas de sinal, comunicação, blindagens, estruturas metálicas e diferenças de potencial no sistema de aterramento. Seus efeitos podem causar falhas imediatas ou degradações sutis, com impacto direto na qualidade das séries históricas e na interpretação do comportamento da barragem.

A utilização de DPS é tecnicamente recomendável para proteção de sistemas de monitoramento automatizado em barragens de concreto, desde que sua aplicação seja coordenada com o tipo de circuito protegido, a sensibilidade dos equipamentos, o nível de proteção requerido e a arquitetura física do sistema. A proteção deve contemplar alimentação, sinais de sensores e comunicação/telemetria.

A eficácia dos DPS depende diretamente da conexão ao sistema de aterramento e da equipotencialização da estrutura. Sem um caminho de baixa impedância para escoamento da corrente transitória, o DPS pode atuar de forma ineficaz ou transferir esforços elétricos para outros pontos do sistema. Por esse motivo, aterramento, SPDA, blindagem e DPS devem ser tratados de forma integrada.

Sistemas alimentados por baterias, painéis solares ou comunicação sem fio podem reduzir alguns caminhos de surto, mas não eliminam automaticamente a necessidade de aterramento funcional. A presença de cabos longos de sensores, antenas, blindagens e estruturas metálicas exige análise específica de equipotencialização e proteção.

Conclui-se que a proteção contra surtos deve ser incorporada desde a fase de projeto e instalação da instrumentação geotécnica. A integração entre engenharia elétrica, geotecnia, automação e operação contribui para a confiabilidade do monitoramento e, consequentemente, para a segurança global de barragens de concreto.

7. PALAVRAS-CHAVE

Barragens de concreto; Instrumentação geotécnica; DPS; Aterramento; Segurança de barragens.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ICOLD. (2000) - “Automated Dam Monitoring Systems”, Bulletin 118, International Commission on Large Dams, Paris.

[2] FERC. (2020) - “Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects: Chapter IX - Instrumentation and Monitoring”, Federal Energy Regulatory Commission, Washington.

[3] USBR. (1987) - “Concrete Dam Instrumentation Manual”, United States Bureau of Reclamation, Denver.

[4] CLAIRMONT, J.; DUPUIS, M.; CHOQUET, P.; BUDIN, R. (1999) - “Lightning Protection and Shielding for Geotechnical Instruments and Data Acquisition Systems”, Geotechnical News, September 1999.

[5] MOULDS, A.; WATSON, A. M. (1992) - “Lightning Protection for Dam Instrumentation: A Case Study of the New Victoria Dam”, technical paper on dam instrumentation and lightning protection.

[6] IEC. (2010) - “IEC 62305: Protection Against Lightning”, International Electrotechnical Commission, Geneva.

[7] ABNT. (2015) - “ABNT NBR 5419: Proteção contra descargas atmosféricas”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[8] IEC. (2011) - “IEC 61643: Low-voltage Surge Protective Devices”, International Electrotechnical Commission, Geneva.

[9] ABNT. (2004) - “ABNT NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[10] DEHN. (2015) - “Lightning Protection Guide”, DEHN SE, Neumarkt.

 FOTO 3x4	**Rodrigo RAFFAELLI YAGNYCZ** Engenheiro Eletricista, especialista em Energias Renováveis, com atuação em projetos de instalações elétricas de baixa e média tensão, SPDA, aterramento, automação e instrumentação aplicada à segurança de barragens e empreendimentos hidrelétricos.
 FOTO 3x4	**Lucas TOKARSKI LIMA** Engenheiro Eletricista, mestrado em sistemas de energia, com atuação em projetos de automação geotécnica, processamento de dados, modelagem de sistemas fotovoltaicos, IA aplicada, automatização de estruturas de concreto e de terra.
 FOTO 3x4	**Cícero José ALBERTON** Engenheiro Eletricista pela UTFPR, com Mestrado em Sistemas Energéticos pelo LACTEC, Diretor Técnico da G5 Engenharia, com mais de 17 anos de atuação em projetos de infraestrutura.
 FOTO 3x4	**Wilson SOARES Junior** Engenheiro Civil pela UFPR, especialista em instrumentação e monitoramento e automação de estruturas geotécncias com 25 anos de experiência em projetos de infraestrutura, hidrogeração e mineração.

SEMANA DE BARRAGENS 2026
DAMSWEEK 2026

VI SIB
SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

RELATORIA DO TEMA · IN.3

Análise de dados no diagnóstico de problemas

VI Simpósio sobre Instrumentação de Barragens e Estruturas Geotécnicas · DamsWeek 2026

Ovídio Santos Jr. · Barroca Engenharia

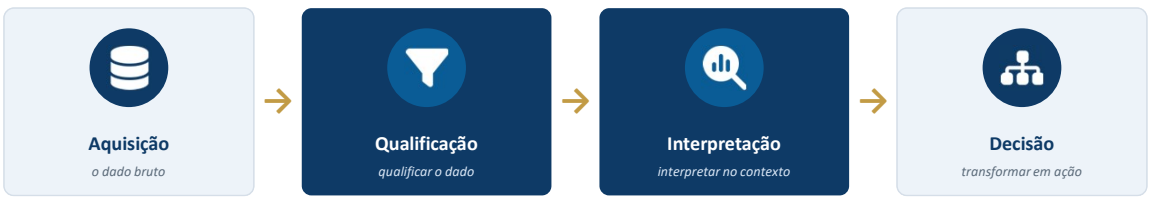
Belém/PA · 24 de setembro de 2026 · 14h10–14h40

POR QUE ESTE TEMA, POR QUE AGORA

O recorte da IN.3

VI SIB SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

JÁ TRATADO NESTA SEMANA acidentes recentes · PNSB / Lei 14.066 · ANM 95/2022 · GISTM · monitoramento 24/7.



O gargalo deixou de ser adquirir dado — **passou a ser qualificá-lo e interpretá-lo.**

> **Ultrapassar um nível de controle é um gatilho de investigação — não um diagnóstico.**

E a simetria engana: leitura ‘normal’ ou ‘seca’ não atesta ausência de problema.

DISTINGUIR RESPOSTA DA ESTRUTURA DE RUÍDO É METADE DO TRABALHO

O problema central: sinal × artefato

VII SIB SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

SINAL ESTRUTURAL

- resposta real do maciço, da fundação ou da drenagem
- confirmada por histórico e instrumentos correlatos
- cruzada com inspeção visual e investigação física
- coerente entre seções e ao longo do tempo

INTERFERÊNCIA

- refração atmosférica em ETR de longo alcance
- água superficial entrando pela tubulação-guia
- efeito sazonal do nível do reservatório
- leitura seca em filtro que está funcionando
- time lag em fundação pouco permeável

Diagnosticar é descartar a interferência **antes de declarar o problema.**

QUATRO ARMADILHAS RECORRENTES NO DIAGNÓSTICO

Onde a prática ainda tropeça

SIB SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Reagir à interferência

como se fosse sinal estrutural — o falso positivo que consome equipe e credibilidade.

Confiar na leitura 'normal'

tratar o dado tranquilo como atestado, quando o problema pode estar fora do alcance do sensor.

Definir o limiar por conveniência

nível de controle tirado da estatística que sobra — sem relação com comportamento físico, ou com o modo de falha que a estrutura pode ter.

Deixar o dado em silos

instrumentação, inspeção visual, vazão e modelo que não conversam; o diagnóstico se perde na costura.

QUATRO GERAÇÕES — E ONDE OS TRABALHOS DA IN.3 SE POSICIONAM

Estado da arte: como o dado vira diagnóstico

SIB SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

LEGADO — FRONTEIRA

Onde vivem os trabalhos da IN.3 — e vários já alcançam o G4

G1
Limite fixo determinístico
base regulatória

G2
Estatístico com sazonalidade
padrão consolidado

G3
Incerteza + anomalia por dados
fronteira atual

G4
Física + dado em tempo real
gêmeo digital · fusão

No contexto brasileiro, vários destes trabalhos não seguem a vanguarda — **eles a definem.**

PANORAMA DA RELATORIA · CONTROLE · DIAGNÓSTICO DE CASOS · QUALIDADE DO DADO

Os 24 trabalhos submetidos à IN.3

VII SIB SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

★ apresentação de hoje · IN.x tema adjacente

Níveis e valores de controle

Níveis de controle e de referência
Daniela R. Ribeiro · CTG Brasil

Pressão neutra: estudo de caso
Iara Moreira · CSN Mineração

Numérico + instrumentação (gravidade)
Saulo S. de Castro · DF+ · UFMG

★ **Controle estatístico com sazonalidade**
Deborah C. da Cruz · Enemax

★ **Gradientes na fundação — Porto Primavera**
Teresa C. Fusaro · Fusaro Eng.

Modelagem sazonal de limites
M. L. Favarão Vieira · Elera · IN.4

Diagnóstico de anomalias em casos reais

Leituras anômalas — Dique 14C, Belo Monte
J. F. Silveira · SBB · Norte Energia

Subpressões e drenagem — UHE Jirau
Stella Lana · Jirau Energia

Umidade em bermas — Amador Aguiar II
Cleber J. de Carvalho · Aliança

Drenagem de pé — UHE Salto-GO
Luan R. A. Souza · Intertechne · CTG

Rebaixamento do freático — PCH (MT)
Camila X. do Couto · Elera

Drenos de alívio — barragem de gravidade
Nathalia G. R. Goulart · HIDROBR

Alteamento de barragem de rejeito
Felipe C. Barbosa · Vale

Qualidade e confiabilidade do dado

Fatores geométricos/atmosféricos em ETR
Gleicilene S. Castro · MCA · AngloGold

Problemas comuns na análise de dados
Marina Ferreira · Pimenta de Ávila

Instrumental + visual — Gangorra/CE
Itamara Taveira · COGERH

Testes de recuperação em piezômetros
Clécio Barbosa · AXIA · Silveira/SBB · IN.1

PANORAMA DA RELATORIA · FORÇANTES · GOVERNANÇA · SENSORIAMENTO

Os 24 trabalhos submetidos à IN.3

VII SIB SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Forçantes externas (chuva, sazonalidade)

Pluviometria e linha freática
Iara Moreira · CSN Mineração

Precipitação e anomalias em barragens
Danielle de Araújo · Vale

Governança e resposta ao desvio (TARP)

★ **TARP p/ dissolução dolomítica na fundação**
Henrique T. G. de Barros · Pimenta de Ávila

Importância dos TARPs — comunicação
Iggor Penha · Progen · Vale

Gestão de contratos geotécnicos
Victor de A. Moreira · Vale · IN.4

Sensoriamento e deformação → IN.4

Dados geoespaciais — fiscalização no Pará
Thales S. Garcia · SEMAS-PA

InSAR × geodésia: validação cruzada
M. L. Favarão Vieira · Elera · CSN · IN.4

★ **Aos autores presentes, o reconhecimento da relatoria.**

24 trabalhos submetidos ao tema — nem todos para apresentação na plenária; todos estão na seção de posts.

TRÊS CASOS DO CORPUS — DADO QUE VIROU DECISÃO

Destaques de diagnóstico

Dique 14C · UHE Belo Monte

DIAGNÓSTICO ESTRUTURADO

J. F. Silveira · SBB · Norte Energia

Seis piezômetros sobem quase juntos. Quatro hipóteses concorrentes — sazonalidade, drenagem, erosão interna, integridade dos selos — testadas até isolar interferência de água superficial, confirmada pela estabilização pós-intervenção.

UHE Jirau

DADO → INTERVENÇÃO → VALIDAÇÃO

Stella Lana · Jirau Energia

Piezometria e retroanálise revelam FS abaixo do critério na fundação aluvionar. A decisão por 137 poços de alívio recupera o fator de segurança de ~1,47 para ~1,74, confirmado pelo monitoramento posterior.

UHE Amador Aguiar II

INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS

Cleber J. de Carvalho · Aliança

A instrumentação indicava normalidade. Geofísica (eletrorresistividade e SP) e química da água apontam a causa-raiz: água pluvial na transição sob o enrocamento — não o reservatório.

CINCO MENSAGENS QUE ATRAVESSAM O CONJUNTO

Os fios condutores

1. O diagnóstico é ato de engenharia, não leitura de mostrador.
2. Distinguir sinal de artefato é metade do trabalho.
3. Integrar instrumento + inspeção + modelo + geofísica + histórico deve ser regra, não exceção.
4. Definir bem o ‘esperado’ é pré-requisito para reconhecer o ‘inesperado’.
5. **Amarrar o valor de controle a um comportamento físico esperado ou ao modo de falha — não a um limiar arbitrário.**

PARA ONDE CAMINHA A ANÁLISE DE DADOS NO DIAGNÓSTICO

Futuro: perspectivas e caminhos

SIB SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

1 **Do limiar estático ao gêmeo digital**

2 **IA explicável como condição de entrada**

3 **Fusão multissensor fibra óptica · InSAR**

4 **Do dado ao risco PFMA · decisão**

5 **Qualificação e saúde do sensor**

CUIDADOS

- Volume não é conhecimento
- Automação não dispensa julgamento
- Alarme estatístico ≠ condição de segurança
- O gargalo é a qualidade do dado.

A tecnologia amplia o alcance; **o diagnóstico continua sendo ato de engenharia.**

TRÊS FACES DO MESMO CAMPO

As três apresentações de hoje

SIB SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

PRÁTICO

Monitoramento de gradientes — Porto Primavera

Teresa Cristina Fusaro

Fusaro Eng. e Consultoria

Controle amarrado ao modo de falha: erosão regressiva pela fundação.

METODOLÓGICO

Valores de controle estatísticos para piezômetros

Deborah Cardoso da Cruz

Enemax Engenharia

O estado da arte estatístico: definir o esperado quando os pressupostos falham.

PROATIVO

TARP para dissolução de rochas dolomíticas

Henrique Teixeira G. de Barros

Pimenta de Ávila Consultoria

Diagnóstico proativo e interdisciplinar: da piezometria à hidrogeoquímica.

PARA OS DEBATES

- Até onde automatizar sem terceirizar o julgamento?
- Quando o dado diz ‘normal’ e o problema existe — o que faltou olhar?
- Modelo data-driven em decisão de segurança: até onde confiar na caixa-preta?

O dado é matéria-prima; o diagnóstico é engenharia.

Nenhum sensor, algoritmo ou satélite substitui a leitura crítica do engenheiro. Eles ampliam nosso alcance; a decisão continua nossa.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

A importância dos TARPs (*Trigger Action Response Plan*) - Interação, Fluxo de Comunicação e Resposta ao Desvio

Iggor PENHA
Geólogo – Progen S.A.

Samuel CARNEIRO
Gerente Técnico – Vale S.A.

Silvia FARIA
Engenheira – Progen S.A.

RESUMO

O monitoramento geotécnico é um dos principais pilares da gestão de risco em estruturas de mineração. A evolução das tecnologias de instrumentação, inspeção e análise de dados tem ampliado a capacidade de identificar mudanças de comportamento e apoiar a tomada de decisões de forma ágil e fundamentada. Nesse contexto, a efetividade do monitoramento depende não apenas da qualidade dos dados obtidos, mas também de processos claros de comunicação, avaliação de desempenho e definição de responsabilidades entre os profissionais envolvidos. Este artigo apresenta as práticas e interações necessárias para a avaliação do desempenho geotécnico por meio de monitoramento e protocolos de resposta, visando subsidiar a gestão de riscos e a tomada de decisão. O artigo aborda os processos de avaliação e atuação baseados em resultados provenientes do monitoramento geotécnico, bem como a utilização desses dados para a avaliação de potenciais modos de ruptura. Também estabelece as responsabilidades e interações entre os profissionais envolvidos. As equipes responsáveis pela comunicação, transmissão de informações e tomada de decisão podem incluir o Centro de Monitoramento Geotécnico, o Responsável Geotécnico e o Engenheiro de Registro (EoR). Cada componente do sistema de monitoramento deve ser concebido para responder a uma necessidade específica, fornecendo informações que contribuam para a avaliação do desempenho e da condição da estrutura.

ABSTRACT

Geotechnical monitoring is one of the main pillars of risk management in mining structures. Advances in instrumentation, inspection, and data analysis technologies have enhanced the ability to identify behavioral changes and support timely, well-founded decision-making. In this context, the effectiveness of monitoring depends not only on the quality of the data collected, but also on clear processes for communication, performance evaluation, and the definition of responsibilities among the professionals involved. This article presents the practices and interactions required for the assessment of geotechnical performance through monitoring and response protocols, with the objective of supporting risk management and decision-making. The article discusses evaluation and response processes based on results obtained from geotechnical monitoring, as well as the use of these data to assess potential failure modes. It also establishes the responsibilities and interactions among the professionals involved. The teams responsible for communication, information dissemination, and decision-making may include the Geotechnical Monitoring Center, the Geotechnical Responsible Engineer, and the Engineer of Record (EoR). Each component of the monitoring system should be designed to address a specific need, providing information that contributes to the assessment of the structure's performance and condition.

1. INTRODUÇÃO

A segurança de estruturas geotécnicas, especialmente barragens de mineração, depende da capacidade de identificar precocemente alterações em seu comportamento e de implementar respostas adequadas antes que essas condições evoluam para cenários de maior gravidade. Nesse contexto, o monitoramento geotécnico desempenha papel fundamental na gestão de riscos, fornecendo informações que subsidiam a avaliação contínua do desempenho das estruturas e a tomada de decisões técnicas e operacionais [1,2,3,5].

Em conformidade com os princípios de governança estabelecidos pelo GISTM (*Global Industry Standard on Tailings Management*), a gestão da segurança de barragens e demais estruturas geotécnicas deve ser conduzida por meio de uma estrutura de governança que assegure a definição clara de papéis e responsabilidades para o monitoramento, avaliação de desempenho, gestão de riscos e tomada de decisão ao longo de todo o ciclo de vida da estrutura. Nesse contexto, o RTFE (Engenheiro Responsável pelas Estruturas de Rejeito) é responsável pela gestão técnica da estrutura geotécnica, avaliação dos dados de monitoramento e coordenação das ações de resposta. O Engenheiro de Registro (EoR) fornece suporte técnico especializado relacionado ao projeto e ao desempenho da estrutura. O Centro de Monitoramento Geotécnico realiza o monitoramento e a gestão dos dados de instrumentação, emitindo alertas quando identificados desvios. O Dono do Risco assegura a gestão dos riscos e a disponibilização dos recursos necessários para seu tratamento. O Dono do Controle é responsável pela implementação e manutenção dos controles definidos e a Geotecnia Corporativa do empreendimento estabelece diretrizes, requisitos técnicos e mecanismos de supervisão para garantir a conformidade com os padrões corporativos e regulatórios.

Para que os dados de monitoramento possam ser utilizados de forma efetiva na gestão da segurança, são estabelecidos níveis de controle associados aos parâmetros de desempenho da estrutura. Esses níveis consistem em limites ou faixas de referência definidos com base em critérios técnicos e julgamento de engenharia, com a finalidade de identificar preventivamente desvios em relação às condições esperadas e indicar potenciais aumentos de risco. Dessa forma, os níveis de controle permitem transformar dados provenientes de inspeções, instrumentação geotécnica e sistemas de monitoramento em informações objetivas para suporte à tomada de decisão [1,3,5].

Associado a esses níveis encontra-se o TARP (*Trigger Action Response Plan*). O TARP é uma ferramenta de gestão de riscos amplamente utilizada em estruturas geotécnicas, como barragens, pilhas de estéril e rejeito, taludes e cavas, cujo objetivo é estabelecer previamente as ações necessárias para responder a desvios identificados durante o monitoramento. Para cada condição ou gatilho definido, o TARP estabelece responsabilidades, fluxos de comunicação, critérios de escalonamento e ações de resposta destinadas a prevenir, controlar ou mitigar os riscos associados. Assim, o atingimento de um determinado nível de controle deve resultar na ativação das ações correspondentes previstas no TARP aplicável, assegurando uma resposta estruturada, consistente e proporcional ao risco observado [1,3,5].

Embora estejam relacionados ao processo de gestão da segurança, os níveis de controle e os TARPs possuem finalidades distintas dos níveis de alerta (atenção, alerta e emergência) e dos níveis de emergência previstos no Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM). Os níveis de controle e os TARPs são ferramentas preventivas voltadas ao gerenciamento operacional do risco, permitindo a identificação precoce de desvios e a implementação de medidas corretivas ou mitigatórias antes que ocorra o comprometimento da condição de segurança da estrutura. Em contrapartida, os níveis de alerta representam condições progressivas de risco associadas à segurança da estrutura. O nível de atenção indica desvios ou anomalias que requerem acompanhamento e avaliação técnica reforçados; o nível de alerta caracteriza uma condição de risco elevada que demanda ações mitigatórias imediatas; e o nível de emergência corresponde a uma situação em que a segurança da estrutura pode estar comprometida. Já os níveis de emergência do PAEBM estão associados à avaliação da gravidade de uma situação caracterizada e à adoção de medidas voltadas à proteção de pessoas, do meio ambiente e do patrimônio, conforme os procedimentos de preparação e resposta a emergências [1,4,5].

Dessa forma, a eficácia de um TARP não depende apenas da definição adequada dos limites técnicos de monitoramento, mas também da existência de processos claros para comunicação, avaliação e tomada de decisão. A integração entre as equipes de monitoramento, os profissionais responsáveis pela estrutura e os especialistas envolvidos na gestão do risco é essencial para garantir que as informações sejam tratadas e implementadas no momento adequado [3,5].

Neste contexto, este artigo apresenta uma proposta para estruturação dos fluxos de comunicação e dos protocolos de resposta associados aos níveis de controle de estruturas geotécnicas. Ao longo do texto, são discutidos os mecanismos de comunicação entre os envolvidos e a integração entre os TARPs e os processos de gestão de emergências, contribuindo para o fortalecimento da gestão de riscos e da segurança operacional na geotecnia aplicada à mineração [1,4,5].

2. ESTRUTURAÇÃO GERAL DOS FLUXOS DE COMUNICAÇÃO

Como apresentado na Figura 1, os responsáveis ou equipes responsáveis envolvidas no processo de comunicação, transmissão de informações e tomada de decisão são: o Centro de Monitoramento Geotécnico, o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e o EoR [3,5].

O Centro de Monitoramento Geotécnico, o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e o EoR devem ter a autoridade de promover ações e tomar decisões que reduzam os riscos geotécnicos e solicitar assistência adequada aos especialistas de geotecnia, com intuito de reduzir, eliminar ou mitigar quaisquer riscos observados ou identificados [1,3,5].

No caso de emergências, ou em casos em que as respostas aos registros de desvios de monitoramento forem tratadas adequadamente, outros envolvidos no processo serão mobilizados [3,4].

A Figura 1 mostra uma representação esquemática da interação e do fluxo de comunicação entre o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica, Centro de Monitoramento Geotécnico e EoR [3,5].

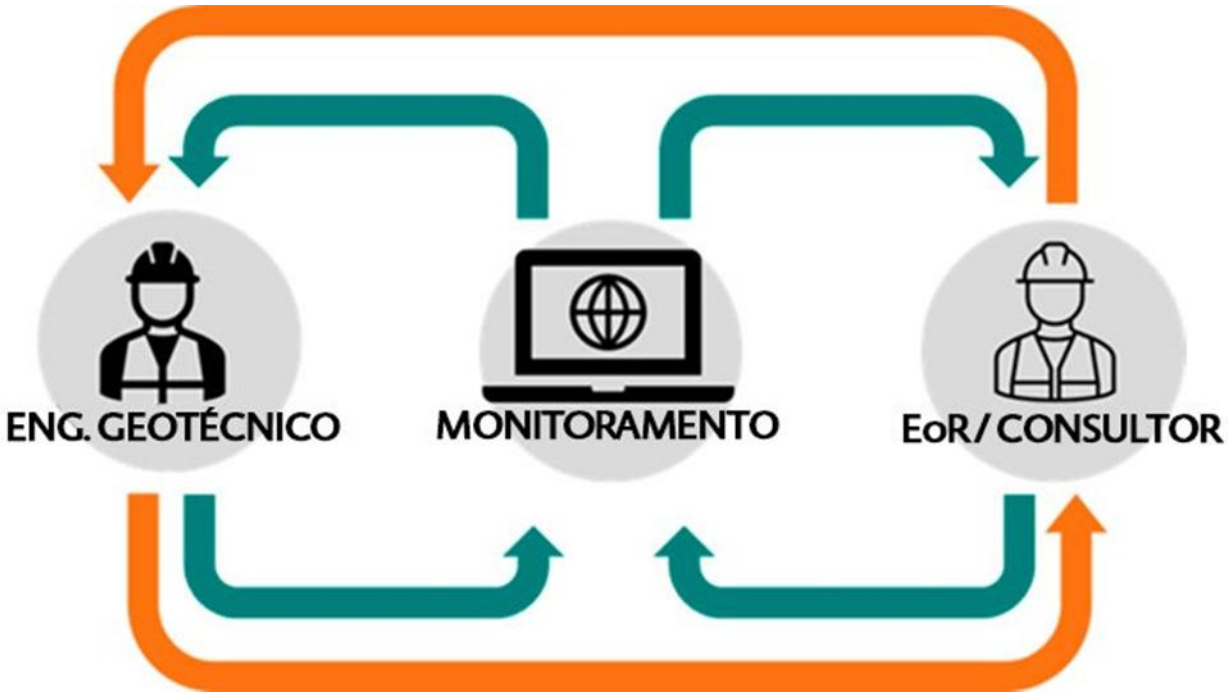


Figura 1 – Representação da interação e fluxo de comunicação.

A comunicação e interação entre o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica, Centro de Monitoramento Geotécnico e EoR são relacionadas às atividades de monitoramento geotécnico e emergência, que se aplicam a cinco cenários [3,4,5]:

1. Identificação de desvios de medição de dados de monitoramento e necessidade de verificação cruzada por meio de inspeção de campo e dados de outros instrumentos [3,5].
2. Realização de inspeções de campo, identificação de anomalias e necessidade de verificação cruzada de validação de dados de monitoramento [3,5].
3. Avaliação de desempenho geotécnico de uma estrutura específica ou em resposta às solicitações específicas de informações e dados para avaliação da condição de segurança do sistema [3,5].
4. Variações identificando a necessidade de ativar protocolos de ação em resposta a desvios (cenário TARP) [3,5].
5. Emergências relacionadas ao acionamento de sirenes [4].

As comunicações e interações para os cenários 1, 2 e 3 são consideradas como rotina. A resposta à solicitação de comunicação deve sempre ocorrer quando solicitada por uma pessoa envolvida (o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica ou Centro de Monitoramento Geotécnico). É requisito que o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica, o Centro de Monitoramento Geotécnico e o EoR tenham acesso irrestrito a todo o sistema de gestão de riscos geotécnicos, de modo que lhes permita consultar e verificar de dados diretamente na fonte [3,5]. A Seção 4 apresenta mais

detalhes do protocolo de comunicação. É importante observar que a responsabilidade geral e final pelo desempenho das estruturas é do Dono do Risco [1,4].

O comunicado do cenário 4, ativação de TARP, ocorre quando há a necessidade de implementar ações de resposta com base em aquisição de registro de monitoramento ou inspeções de campo que corresponda a um nível pré-definido de alarme ou "gatilho" (*trigger*) [1,3,5]. A Seção 4 apresenta mais detalhes do processo TARP.

O cenário 5 envolve preparar-se para emergências, incluindo ter um plano de ação e saber como buscar apoio rapidamente. A resposta rápida e a comunicação eficiente podem fazer toda a diferença na minimização dos impactos negativos e no salvamento de vidas [1,4].

Um relacionamento de transparência e colaboração efetiva entre os principais responsáveis envolvidos é essencial para garantir comunicação efetiva e preparação para tratar um evento inicial, que demande ação de emergência [3,4,5]. Assim sendo, o plano de monitoramento, que é o ponto de partida da análise de dados e parte do plano de gestão geotécnica (Manual de Operação ou documento equivalente), deve ser elaborado pelo responsável pela estrutura geotécnica e pelo Engenheiro de Registro, com o intuito de contribuir e endossar os TARPs, e dar suporte à gestão de desempenho de cada estrutura [3,5]. Os TARPs têm o objetivo de serem ferramentas preventivas de gestão de riscos [1,3,5].

A equipe de geotecnia deve elaborar documentação ou procedimentos específicos, que atinjam objetivos específicos, a fim de estabelecer a estratégia de comunicação para cada responsabilidade chave descrita a seguir [3,5].

3. COMUNICAÇÃO DE ROTINA ENTRE OS STAKEHOLDERS

Comunicação de rotina refere-se à que ocorre no dia a dia, em que o EoR, o Centro de Monitoramento Geotécnico e o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica interagem e informam sobre atividades normais. Entende-se comunicação de rotina como associada ao nível verde ou nominal em um TARP, que é a condição base de monitoramento [3,5]. A comunicação de rotina inclui os seguintes procedimentos:

- o Centro de Monitoramento Geotécnico disponibiliza, sob demanda, dados de monitoramento de cada estrutura para o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e EoR; ter informações relativas à condição e disponibilidade dos instrumentos em operação para cada estrutura, *status* de alarme/sirene, variação de dados e quaisquer pontos em destaque, todos atualizados diariamente [3,5];

- recomenda-se que o Centro de Monitoramento Geotécnico tenha e mantenha um relatório de *status*, periodicamente, atualizado dos indicadores chave de desempenho para cada estrutura [3,5];

- é desejável que o Centro de Monitoramento Geotécnico elabore e envie um relatório às partes interessadas na periodicidade solicitada (ou quando necessário), incluindo um resumo dos resultados de monitoramento para cada período de monitoramento de cada estrutura. O engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e o EoR tem autonomia para definir o formato padrão e o conteúdo do relatório, de acordo com os requisitos da empresa [3,5];

- o Centro de Monitoramento Geotécnico pode elaborar avaliações e relatórios sobre dados mediante solicitação do EoR e/ou do engenheiro responsável pela estrutura geotécnica. Essas avaliações e relatórios fornecem dados de monitoramento da instrumentação, não resultados de interpretação da performance da estrutura. É necessário que o Centro de Monitoramento Geotécnico envie todo o processo de documentação para o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e o EoR mediante solicitação [3,5];

- os resultados das revisões dos relatórios de monitoramento, emitidos pelo engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e/ou EoR, devem ser disponibilizados para o Centro de Monitoramento Geotécnico. O objetivo dessa troca é permitir que o Centro de Monitoramento Geotécnico tenha oportunidade de melhoria contínua de suas atividades [3,5].

4. PROTOCOLO DE AÇÕES EM RESPOSTA AO DESVIO (TARP)

Um Protocolo de Ações em Resposta ao Desvio (TARP) é um elemento chave da gestão de riscos [1,3,5]. O TARP deve fornecer orientação clara sobre ações a serem implementadas quando o desempenho da estrutura se desviar da condição esperada [3,5]. Os TARPs definem os procedimentos necessários para mitigar consequências significativas de um evento indesejado ou evitar sua ocorrência [1,3,5]. Condições que possam levar a um evento indesejado e os níveis de alerta que identificam ações a serem tomadas, precisam ser verificadas, periodicamente, ou mediante solicitação, de acordo com a experiência de desenvolvimento [3,5]. Estabelecer TARPs e respectivos responsáveis por sua implementação pode minimizar impactos, salvar vidas, evitar danos a equipamentos e outras possíveis perdas ou alterações indesejadas no plano de negócios [1,3,4].

Os valores dos níveis de alerta devem ser revistos, periodicamente, especialmente os que são baseados em dados históricos, valores empíricos, ou desenvolvidos com utilização de outros métodos, como *benchmarking* de estruturas semelhantes [3,5]. Entretanto, quaisquer alterações de níveis de alerta devem ser feitas mediante aprovação do engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e anuência do EoR. Quando um limite de referência é disparado por um desvio verificado por revisão dos dados de monitoramento, um processo definido pelo TARP é acionado [3,5].

O TARP identifica uma série de níveis de referência (normalmente quatro, como apresentado na Tabela 1), varia de baixo risco a alto risco [1,3,5]. Cada nível é associado à várias ações e controles, inclusive o(s) responsável(eis) pela implementação dessas ações [3,5].

A implementação de dispositivos em tempo real para monitoramento geotécnico crítico proporciona uma melhor compreensão dos cenários de risco e seus controles [5]. Com a aprovação do EoR, o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica deve decidir sobre o formato adequado do TARP a ser utilizado em uma determinada aplicação. A Tabela 1 apresenta um exemplo de uma construção simples de TARP e de ações a serem tomadas. Um TARP mais abrangente definirá ações a serem tomadas, requisitos de comunicação e responsáveis [3,5].

Assim sendo, os TARPs são, inerentemente, uma ferramenta preventiva de gestão de riscos, suportados pelo processo de inspeção e dados de monitoramento

de desempenho obtidos pelo Centro de Monitoramento Geotécnico. Os fundamentos do TARP incluem realização de avaliação geotécnica da estrutura pelo engenheiro responsável pela estrutura geotécnica, com o suporte do EoR [3,5].

Tabela 1 – Exemplo de elaboração de um TARP

Nível	Critério para determinar o nível				Ações
	Velocidade Radar	Movimento prisma	Evento de chuva	Anomalia	
Verde	<3 mm/h	< 50 mm/dia	< 7,5 mm/dia	Nenhuma	Continuar monitorando
Amarelo	≥3 - <5 mm/h	≥50 - <75 mm/dia	≥7,5 - <15 mm/dia	Primeira vez	Verificar a veracidade dos dados e notificar caso seja uma informação real
Laranja	≥5 - <8 mm/h	≥75 - <100 mm/dia	≥15 - <25 mm/dia	Constante	Realizar inspeção de campo para avaliação da informação
Vermelho	≥8 mm/h	≥100 mm/dia	≥ 25 mm/dia	Aumentou	Evacuação imediata da área e, posteriormente, avaliação dos dados

Nota[1]: Verde - condição de risco baixo nominal [1,3,5]; Amarelo - alerta de risco baixo [1,3,5]; Laranja - risco moderado [1,3,5]; Vermelho - risco alto [1,3,4,5].

Todos os casos de alertas verde, amarelo, laranja ou vermelho devem ser notificados por e-mail a uma lista mínima de destinatários, dependendo do fluxo de comunicação, de acordo com os requisitos dos TARPs envolvidos [4,6].

5. ENVIO DO COMUNICADO 1 DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS NORMAIS - TARP VERDE

A área de geotecnia reporta, mensalmente, as condições operacionais normais (TARP verde) e o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica envia um comunicado por e-mail (mensalmente) para a lista de destinatários pré-definida com os *stakeholders*. A geotecnia mantém as atividades de desenvolvimento de rotina.

Uma lista de distribuição de comunicado deve conter os responsáveis mínimos, aprovada pela liderança de geotecnia, que tem autoridade para acrescentar nomes à lista de distribuição.

Se o desvio atingir o limite de referência amarelo, ou seja, o resultado dos dados é igual ou maior ao limite estabelecido para ativação [3,5], deve-se prosseguir para a Seção 6, descrita a seguir.

6. ENVIO DO COMUNICADO DE ATINGIMENTO DE NIVEL

Quando um instrumento de monitoramento atinge um limite de referência, a equipe de geotecnia deve realizar a notificação de atingimento de nível ao engenheiro

responsável pela estrutura geotécnica e EoR, via comunicação formal, e apoiar na análise e validação do dado.

Ao ser notificado pelo, o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica deve analisar os dados do instrumento que atingiu o limite e responder ao e-mail, indicando se o limite de referência corresponde ou não a uma situação real. Caso seja ativado, devem ser seguidas as etapas descritas abaixo.

7. PROCEDIMENTOS DE TARPS AMARELO A VERMELHO

Quando um limite de referência é ativado, se confirmado, um procedimento é implementado, de acordo com as características descritas neste artigo. O procedimento é implementado e coordenado pelo engenheiro responsável pela estrutura geotécnica, Centro de Monitoramento Geotécnico e EoR.

8. VERIFICAÇÃO DE LEITURA

A equipe de geotecnia realiza ou solicita, se necessário, a verificação das leituras do instrumento. As leituras do instrumento podem ser validadas no escritório do Centro de Monitoramento Geotécnico (relativos à sistemas, comunicação, sensores etc.) ou no campo, dependendo do tipo de leituras de instrumento que ativaram o alerta de TARP. Caso sejam equipamentos de monitoramento de deslocamento, como por exemplo, Radar Terrestre ou Estação Total Robotizada (ETR), a verificação deve ser realizada com o operador do equipamento, de acordo com um processo de garantia de qualidade (QA) [5].

IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE LEITURA

Com base nos resultados de verificação de leitura, a equipe do Centro de Monitoramento Geotécnico ou da geotecnia analisa e reporta se houve erro de leitura, defeito de instrumento/sensor, erro na transmissão de dados, erro de registro etc.

TRATAMENTO DE ERROS

A equipe de geotecnia analisa os erros de leitura (a responsabilidade da leitura em campo é da Geotecnia Operacional), identifica a causa do problema, e realiza a correção necessária na base de dados.

9. ANÁLISE DE DADOS DE MONITORAMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO

Para cada estrutura, a geotecnia verifica e promove a qualidade dos dados da instrumentação de monitoramento. O engenheiro responsável pela estrutura geotécnica analisa e interpreta os dados, de acordo com o procedimento padrão para análise e interpretação de dados necessária para essa finalidade. Essa verificação inclui a revisão das leituras nos instrumentos utilizados para monitoramento da estrutura.

10. ENVIO DO COMUNICADO DO PROCEDIMENTO DE TARP - NÍVEL DE TARP AMARELO

Quando as condições normais são ultrapassadas, o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica está em comunicação com o Engenheiro de Registro [3,5].

Notificações são feitas, de acordo com a ativação do TARP, e o desenvolvimento continua com as atividades de rotina.

O engenheiro responsável pela estrutura geotécnica deve informar por e-mail ativação de TARP AMARELO (em até 72 horas úteis). O procedimento estará concluído quando o comunicado for enviado à lista de destinatários, definida pelos *stakeholders*. Uma lista de distribuição de comunicados deve conter os responsáveis mínimos, aprovados pela liderança de geotecnia, que tem autoridade para acrescentar nomes a essa lista.

Se o desvio atingir o limite de referência, se confirmado, ou seja, o resultado dos dados de monitoramento do instrumento ou inspeção é igual ou maior do que o limite estabelecido para a ativação do TARP LARANJA.

11. INSPEÇÃO

O engenheiro responsável pela estrutura geotécnica realiza ou solicita uma inspeção da estrutura, para identificação ou confirmação de anomalias [3,5]. Um alerta de TARP pode ser ativado por observações na estrutura geotécnica. No caso de alerta gerado de forma remota, o responsável pela estrutura deve validar a confiabilidade do alerta. Com base nos dados obtidos, o EoR pode ser chamado para suportar uma avaliação da confiabilidade do alerta e ajudar a classificá-lo. A abordagem observacional pode lidar de forma efetiva com condições imprevisíveis, mas requer experiência prática e compreensão do propósito do projeto e do contexto de monitoramento de desempenho [2,5].

Após a confirmação da leitura, se o limite de referência atingido for suficiente para ativar o TARP VERMELHO, prosseguir para a Seção “ENVIO DO COMUNICADO - NÍVEL DE TARP VERMELHO”.

12. AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA

Com base nos dados de inspeção e monitoramento obtidos, o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica realiza uma avaliação geotécnica, conforme a necessidade, e prossegue para a próxima seção.

13. ELABORAÇÃO DO RELATÓRIO DE ANÁLISES DE PERFORMANCE

É recomendado que um Relatório de Análises de Performance seja elaborado, com base na avaliação geotécnica [5].

14. ENVIO DO COMUNICADO DO PROCEDIMENTO DE TARP - NÍVEL DE TARP LARANJA

Quando as condições do monitoramento são compreendidas e validadas, a operação pode voltar às atividades, de acordo com os requisitos condicionais. Se isso não for possível, o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica pode elevar o risco a um limite de referência vermelho. Ações e comunicados são registrados e reportados, de acordo com os procedimentos de TARP e Plano de Ação Emergencial [1,3,4,5].

O engenheiro responsável pela estrutura geotécnica informa por e-mail a ativação do TARP LARANJA (em até 48 horas úteis), com o Relatório de Análise de Performance. A área afetada é controlada para restrição de acesso e o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica notificam ao Engenheiro de Registro para avaliar a situação de forma coletiva e propõe um processo corretivo, incluindo a ativação do TARP adequado [3,5]. O comunicado é enviado para a lista de distribuição mínima definida pelos *stakeholders*.

Se o desvio atingir o Nível Vermelho (risco alto), ou seja, o resultado dos dados de monitoramento do instrumento ou inspeção é igual ou maior do que o limite estabelecido para a ativação do TARP VERMELHO, deve-se prosseguir para a Seção 15.

15. ENVIO DO COMUNICADO DO PROCEDIMENTO DE TARP - NÍVEL DE TARP VERMELHO

A área operacional afetada é evacuada e a área de geotecnia comunica, por ligação e/ou rádio, à área operacional [4,5]. O engenheiro responsável pela estrutura geotécnica comunica a ativação do TARP VERMELHO, via e-mail (em até 24 horas úteis), com o Relatório de Análise de Performance [3,4,5]. O comunicado é enviado à lista de distribuição mínima definida pelos *stakeholders*.

A situação é avaliada e, se confirmada, as recomendações são registradas e reportadas às partes interessadas. Mediante aprovação e autorização pelo Dono do Risco, quanto às recomendações corretivas, o dono do controle, o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e o EoR devem executar a implementação bem-sucedida do plano de ação [1,3,5]. A área deve, então, continuar a ser monitorada e revisada cuidadosamente (pela equipe de geotecnia), até que a condição crítica seja resolvida, antes de ser liberada da condição de TARP VERMELHO [3,5].

A liderança de geotecnia é chamada para auxiliar no plano de resposta com o apoio do engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e do EoR, que devem avaliar a situação e elaborar recomendações corretivas [1,3,5]. O atingimento do Nível Vermelho (risco alto) requer que a área de geotecnia corporativa, caso exista, seja informada [3,5].

Essa lista de distribuição de comunicado deve conter os destinatários mínimos aprovados pela liderança de geotecnia, que tem autoridade para acrescentar nomes a essa lista.

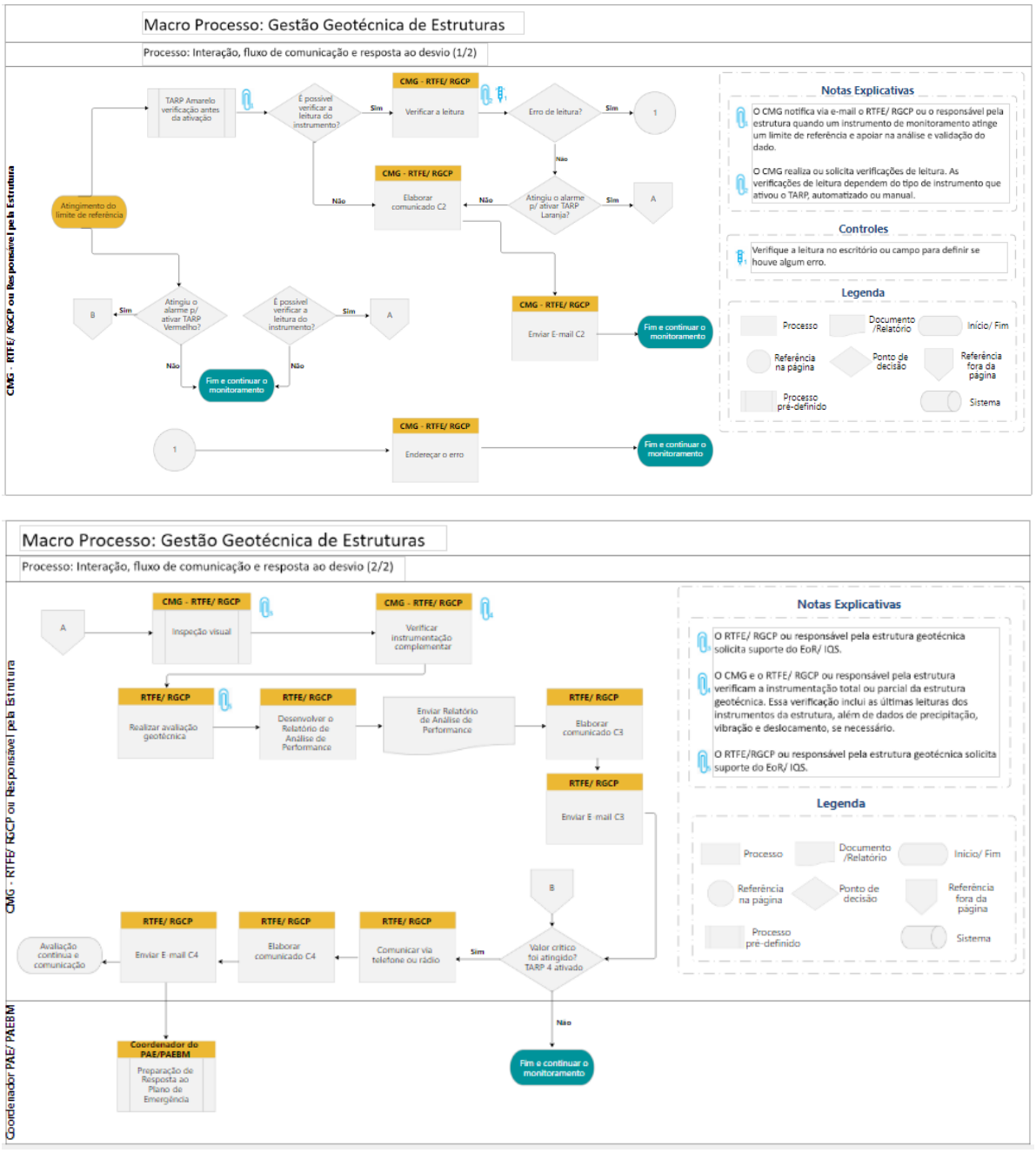


Figura 2 – Fluxo de comunicação para os eventos de TARP.

16. ATIVAÇÃO DO PLANO DE RESPOSTA À EMERGÊNCIA

O Plano de Emergência pode ser ativado mediante os três cenários a seguir:

- No caso de ruptura ou falha iminente da estrutura [1,4];
- Somente para o Brasil: no caso de estruturas de barragens, ao atenderem aos requisitos exigidos pela ANM;
- Quando uma variação criar incerteza em relação à segurança da estrutura geotécnica, que inclui julgamento de engenharia pelo engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e suporte do EoR [1,3,4,5].

Independente dos itens descritos acima, o plano de emergência pode ser ativado a qualquer hora, considerando o julgamento de engenharia do engenheiro responsável

pela estrutura geotécnica e/ou do EoR [1,3,4,5]. A ativação do plano de emergência pode também ser justificada com o suporte da avaliação das possíveis condições de emergência pelo engenheiro responsável pela estrutura geotécnica, EoR, equipe geotécnica ou recomendação de um profissional fora do âmbito operacional, que deve haver, nesse caso, aprovação da liderança de geotecnia [1,3,4].

O julgamento de engenharia do engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e/ou EoR deve incluir previsão de níveis de alerta revisados antes ou após o plano de emergência ser ativado [1,4,6]. Além disso, os planos de emergência devem ser atualizados com base na experiência e nos resultados reais [1,3,4].

17. VERIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

A verificação do TARP e/ou procedimento de resposta à emergência deve ser feita considerando-se tanto a condição normal, TARP VERDE, quanto as condições de ativação dos níveis de alerta TARP AMARELO, LARANJA e VERMELHO.

Para verificação de rotina, os seguintes procedimentos de verificação são recomendados:

a) testar o sistema de comunicação do Centro de Monitoramento Geotécnico para o EoR, o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e vice-versa [3,5];

b) testar o sistema de comunicação para confirmar se o Centro de Monitoramento Geotécnico está recebendo cópias dos relatórios da área operacional [3,5];

c) realizar verificações para confirmar se o Centro de Monitoramento Geotécnico mantém registros diários e se as informações de qualquer desvio de leitura são informadas de maneira adequada ao engenheiro responsável pela estrutura geotécnica e ao EoR. Para esses comunicados, realizar, também, verificações para confirmar se as respostas aos relatórios de desvio são úteis [3,5].

Em relação à verificação de situações em que os protocolos de resposta a desvios são ativados, testes de simulação devem ser realizados para verificar se a comunicação ocorre em tempo hábil e com registros adequados. Essas simulações devem ser realizadas por dados de teste coletados de instrumentos ou sensores críticos ou por meio de relatórios de inspeção fictícios [3,5].

18. CONCLUSÕES

Os TARPs constituem uma ferramenta fundamental para a gestão de riscos em estruturas geotécnicas, permitindo que desvios identificados por meio das inspeções e do monitoramento sejam tratados de forma estruturada, consistente e proporcional ao nível de risco observado. Sua efetividade está diretamente relacionada à definição clara dos critérios de ativação, das responsabilidades, das ações de resposta e dos fluxos de comunicação entre os profissionais envolvidos [1,3,5].

A integração entre o Centro de Monitoramento Geotécnico, o engenheiro responsável pela estrutura geotécnica, o EoR e os demais agentes da governança geotécnica é essencial para garantir a adequada avaliação das informações de monitoramento, a implementação das ações previstas e a tomada de decisão [1,3,5].

Além disso, os fluxos de comunicação e os protocolos apresentados demonstram a importância de processos formalizados para o tratamento de desvios, assegurando rastreabilidade, alinhamento entre as partes interessadas e maior confiabilidade na gestão da segurança das estruturas. A aplicação adequada dos TARPs, suportada por dados de monitoramento confiáveis, avaliações geotécnicas e comunicação efetiva, contribui para o fortalecimento da gestão de riscos e para a manutenção das condições de segurança ao longo do ciclo de vida das estruturas geotécnicas [1,3,5].

19. PALAVRAS-CHAVE

TARP, Comunicação, Risco, Anomalia, Monitoramento.

20. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FELL, R. et al. (2014) – "Guidelines for the management of dam safety", CRC Press, Londres.

[2] READ, J.; STACEY, P. (2009) – "Guidelines for Open Pit Slope Design", CSIRO Publishing, Collingwood.

[3] ICOLD. (2021) – "Dam Surveillance Guide", Bulletin 158, Paris.

[4] ANM. (2022) – "Resolução nº 95/2022: Estabelece normas para a segurança de barragens de mineração", Brasília.

[5] SHARON, R.; EBERHARDT, E. (2020) – "Guidelines for slope performance monitoring", CRC Press.

 FOTO 3x4	**Iggor PENHA** Graduado em Bacharelado em Geologia pela Universidade de Belo Horizonte e Pós-Graduado em Engenharia de Geotecnia pela PUC Minas. Atuou nas áreas de Monitoramento Geotécnico com foco em Radares Interferométricos e monitoramento remoto. Atualmente apoia da equipe da Segunda Linha de Defesa de Geotecnia Corporativa, com ênfase nas áreas normativas e de geotecnologia, para aprimorar o monitoramento geotécnico de estruturas da Vale S.A.
 FOTO 3x4	**Samuel CARNEIRO** Graduado em Engenharia Geológica pela Universidade Federal de Ouro Preto e mestre em Geotecnia pela Universidade Federal de Viçosa com mais de 20 anos de experiência na área de mineração. Ao longo da sua carreira profissional atuou nas áreas de Hidrogeologia, Geotecnia de Mina, Geologia, Barragens e Monitoramento Geotécnico. Atualmente é parte da equipe de Geotecnologia de estruturas geotécnicas da Vale S.A.
 FOTO 3x4	**Silvia FARIA** Graduada em Engenharia Civil, Pós-graduada em Geotecnia e Mestra em Gestão da Construção Civil. Atuou em projetos de engenharia, acompanhamento de obras, na implementação do GISTM na mineração. Atualmente atuo na equipe da Segunda Linha de Defesa de Geotecnia Corporativa, na área de monitoramento e sistemas de engenharia, com foco em normativos técnicos, gestão de indicadores e desenvolvimento de estratégias para otimização de sistemas de monitoramento.

ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA INFLUÊNCIA DE FATORES GEOMÉTRICOS E ATMOSFÉRICOS EM DADOS DE ETR

Gleicilene da Silva Castro

Engenheira de Processos - MCA Auditoria e Gerenciamento Ltda.

Paulo Carvalho Barbusa Nascimento

Técnico de Instrumentação na AngloGold Ashanti

Lilian Agda de Oliveira

Coordenadora Geotécnica na AngloGold Ashanti

Herbert Castro Filho

Gerente do Centro de Monitoramento Geotécnico na AngloGold Ashanti

RESUMO

O monitoramento geotécnico por Estação Total Robótica (ETR) é amplamente empregado para a detecção de deslocamentos superficiais em estruturas geotécnicas. Este trabalho apresenta uma análise exploratória desenvolvida em uma barragem localizada na região Centro-Oeste do Brasil, com foco na redução da elevada amplitude de variação observada nas medições de monitoramento. Foram revisados os critérios operacionais e geométricos do sistema, com reparametrização das leituras, ampliação da redundância observacional, filtragem estatística pelo critério de 3 sigmas e realização de testes controlados para correção das componentes vertical e de distância. Os resultados indicaram redução da dispersão dos dados, melhora da coerência temporal das leituras e maior aderência do sistema às condições reais de campo, evidenciando a influência de fatores geométricos e atmosféricos, especialmente da refração atmosférica em monitoramentos de longo alcance. Conclui-se que a avaliação crítica da qualidade dos dados e a adoção de correções dedicadas constituem etapas fundamentais para aumentar a confiabilidade da interpretação geotécnica e apoiar decisões operacionais mais seguras.

ABSTRACT

Geotechnical monitoring using Robotic Total Stations (RTS) is widely applied to detect surface displacements in geotechnical structures. This paper presents an exploratory analysis carried out at a dam located in the Brazilian Midwest, aiming to reduce the high amplitude previously observed in the monitoring measurements. The methodology comprised a review of the operational and geometric criteria of the monitoring system, including measurement re-parameterization, increased observational redundancy, statistical filtering based on the 3-sigma criterion, and controlled tests to correct the vertical

and slope-distance components. The results indicated a significant reduction in data dispersion, improved temporal coherence of the readings, and better adherence of the system to actual field conditions, highlighting the influence of geometric and atmospheric factors, especially atmospheric refraction in long-range monitoring. It is concluded that critical data-quality assessment and the implementation of dedicated corrections are essential to improve geotechnical interpretation reliability and to support safer operational decision-making.

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens depende da manutenção contínua de sua integridade estrutural e operacional ao longo de todo o ciclo de vida da estrutura, com o objetivo de preservar vidas, patrimônio e o meio ambiente. Nesse contexto, o monitoramento geotécnico, entendido como a integração entre instrumentação, inspeções e análise técnica, constitui elemento fundamental para a detecção precoce de anomalias, o acompanhamento do desempenho estrutural e o suporte à tomada de decisão. No Brasil, esse arcabouço é estabelecido pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010 [1].

No caso específico de barragens de mineração, o ambiente regulatório reforça a necessidade de sistemas de monitoramento compatíveis com a complexidade e o nível de risco das estruturas. A Resolução ANM nº 95/2022 consolida os atos normativos aplicáveis à segurança de barragens de mineração e estabelece, para determinadas condições, a obrigatoriedade de sistemas automatizados de instrumentação com acompanhamento em tempo real e período integral, incluindo redundância no fornecimento de energia [2].

Nesse cenário, instrumentos de alta precisão, como as Estações Totais Robóticas (ETR), assumem papel relevante por possibilitarem medições frequentes e rastreáveis de deslocamentos, com potencial de integração a plataformas de gestão de dados e rotinas de controle de qualidade. A ETR é um instrumento geodésico capaz de medir ângulos horizontais e verticais e a distância inclinada entre a estação e prismas, permitindo a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos monitorados. Sua versão robótica agrega capacidades de automatização, viabilizando leituras sequenciais e periódicas sem necessidade de intervenção manual em campo, característica essencial para o monitoramento contínuo de estruturas críticas.

Em sistemas de monitoramento geotécnico de barragens, a utilização de ETRs permite a geração de séries temporais de deslocamentos de alta precisão. As medições realizadas possibilitam a avaliação de deslocamentos horizontais e verticais, bem como o acompanhamento da distância inclinada e dos ângulos horizontal e vertical, parâmetros fundamentais para a interpretação do comportamento estrutural. A confiabilidade dessas séries temporais depende diretamente da correta definição e estabilidade dos prismas de referência, utilizados como base geométrica do sistema, e dos prismas de monitoramento, instalados nas áreas de interesse geotécnico. Entretanto, a qualidade das medições por ETR pode ser significativamente afetada por fatores não geotécnicos, especialmente em monitoramentos de longas distâncias. Entre esses fatores, destaca-se a refração atmosférica, fenômeno associado à variação do índice de refração do ar em função de condições meteorológicas, como temperatura, pressão e umidade. A refração pode introduzir erros sistemáticos nas medições de ângulo e distância, afetando principalmente a componente vertical dos deslocamentos e gerando variações da mesma ordem de grandeza dos movimentos reais que se busca monitorar.

Apesar do uso amplamente difundido das ETRs em sistemas de monitoramento geotécnico, a literatura técnica costuma concentrar-se na descrição do funcionamento dos instrumentos ou na apresentação de resultados de deslocamento. Observa-se menor ênfase na discussão sistemática dos processos intermediários de controle de qualidade dos dados, na identificação de ruídos instrumentais e nas estratégias operacionais de mitigação de erros sistemáticos em ambientes de operação contínua. Dunnicliff [3] e Mikkelsen [4] destacam que a confiabilidade da instrumentação geotécnica não depende apenas da precisão nominal dos equipamentos, mas também da correta interpretação dos dados e do tratamento adequado das diferentes fontes de erro associadas à medição.

Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é avaliar e sistematizar intervenções técnicas aplicadas a um sistema de monitoramento geotécnico por ETR, visando à melhoria da qualidade, estabilidade e confiabilidade dos dados de deslocamento, por meio da identificação das principais fontes de ruído e da demonstração de estratégias práticas de correção e validação dos dados em ambiente operacional contínuo.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo corresponde a uma estrutura geotécnica monitorada por Estação Total Robótica, inserida em um complexo operacional com acesso controlado. O sistema de monitoramento é composto por três prismas de referência e dez prismas de monitoramento, distribuídos de modo a permitir o acompanhamento contínuo dos deslocamentos da estrutura.

Os prismas de referência constituem a base geometrica do sistema de monitoramento. São instalados em locais estáveis, de preferência em terreno natural, onde não é esperado deslocamentos. Eles são utilizados como parâmetros de estabilidade da estação total robótica, pontos de controle de qualidade das leituras e como referecial adotado durante os ciclos. É necessário garantir a confiabilidade desses prismas, visto que qualquer movimentação, mesmo sendo ela minima, acometem sistematicamente as coordenadas calculadas.

Em contrapartida, os prismas de monitoramento são instalados na estrutura de interesse, posicionados de acordo com critérios geotécnicos e operacionais, tendo como objetivo a identificação de tendências de deslocamentos ao longo do tempo. As coordenadas obtidas são comparadas ao referencial definido, de forma que seja possivel identificar os deslocamentos verticais e horizontais da estrutura.

Os prismas de referência encontram-se posicionados a distâncias inferiores a 50 m em relação à estação, enquanto os prismas de monitoramento estão localizados a uma distância média de aproximadamente 1,7 km, variando entre cerca de 1,6 km e 1,8 km. Trata-se, portanto, de um monitoramento de longo alcance, no qual efeitos atmosféricos e geométricos tendem a influenciar a variabilidade dos dados. Embora o controle de visada seja realizado, destaca-se a presença de vegetação arbustiva densa entre a estação e a estrutura monitorada.

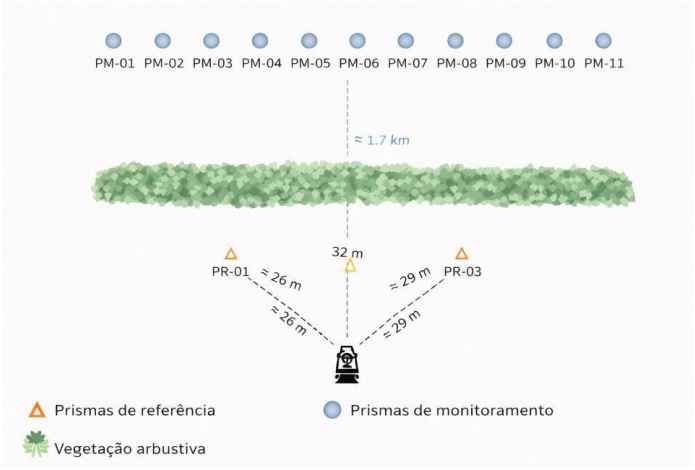


Figura 1 – Geometria do monitoramento.

O monitoramento é realizado por meio de uma Estação Total Robótica Leica TM60, equipamento de alta precisão amplamente utilizado em aplicações geotécnicas e de monitoramento estrutural. De acordo com as especificações do fabricante, o equipamento apresenta precisão angular da ordem de 0,5" ou 1" e precisão de medição de distância a prisma compatível com medições milimétricas em aplicações de monitoramento [5].

O sistema também contemplava um elemento fundamental para a minimização de interferências externas: o sensor ativo de temperatura e pressão, utilizado para compensação dos efeitos atmosféricos e para o aprimoramento da confiabilidade das medições.

2.2 Metodologia e intervenções aplicadas

Com base nas condições observadas e na análise preliminar dos dados, foram identificadas amplitudes elevadas nas séries temporais de deslocamento, não compatíveis com o comportamento esperado da estrutura (Figura 2).



Figura 2 – Variação do deslocamento horizontal e vertical dos prismas monitorados em 30 dias

As figuras evidenciam alta amplitude de variação nos dados de deslocamento ao longo de 30 dias, com oscilações frequentes e picos abruptos em diversos prismas, comportamento este incompatível com uma resposta estrutural contínua e uniforme. No gráfico de deslocamento horizonta, observa-se pico máximo positivo da ordem de +250 mm. Já no gráfico de deslocamento vertical, a variabilidade é ainda mais expressiva, com pico máximo

positivo em torno de +330 mm.

No presente estudo, os prismas de monitoramento encontravam-se a uma distância máxima de 1,8 km da estação, caracterizando uma condição de longo alcance. Considerando a precisão nominal da medição de distância da Leica TM60, da ordem de 0,6 mm + 1 ppm, seria esperada, para essa faixa, uma incerteza linear aproximada entre 2,2 mm e 2,4 mm na componente de distância. Ainda que os deslocamentos horizontais e verticais sejam parâmetros calculados, e não medições diretas de distância, a amplitude observada nos dados mostrou-se significativamente superior à ordem de grandeza esperada para esse arranjo de monitoramento.

Com o intuito de identificar possíveis causas para a alta amplitude de variação dos dados, foi observado que a maior contribuição para este problema poderia estar no ângulo vertical. Diante disso, foi levantado algumas questões que poderiam estar influenciando este dado, sendo eles: o índice de refração e a dilatação do pilar da estação.

As variações do *tilt* no período noturno mostraram que o pilar varia muito com o ganho e perda de temperatura, além disso, no período de maior estabilidade é que a componente vertical tem maiores amplitudes e inconsistências (Figura 3).

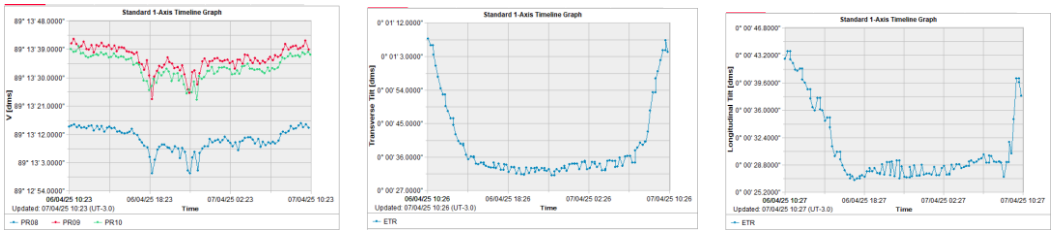


Figura 3 – Correlação entre ciclos térmicos e ruído no ângulo vertical

Diante desse contexto, foi adotado um conjunto de intervenções com foco na redução da dispersão dos dados e no aumento da confiabilidade das medições, contemplando ajustes nos parâmetros de aquisição, tratamento estatístico dos dados e estratégias de correção geométrica e atmosférica.

2.2.1 Parametrização dos desvios padrão e rigor estatístico

A decisão pela reparametrização fundamentou-se em uma análise detalhada do comportamento da ETR. A partir do monitoramento dos gráficos de tilt da estação, observou-se correlação entre a oscilação dos dados e os ciclos térmicos do pilar da estação.

Como contramedida, estabeleceu-se o incremento da redundância amostral, elevando o número de leituras por prisma para duas a três repetições por ciclo. Essa estratégia permitiu o cálculo de médias mais robustas e o controle do desvio padrão em tempo real. Embora tal configuração resulte em aumento do tempo de ciclo, buscou-se melhorar a qualidade e a estabilidade estatística dos dados.

A robustez do dado primário foi reforçada por três pilares: (i) aumento do número de amostras por ciclo, permitindo médias mais estáveis; (ii) inclusão de rotinas automáticas de nova medição em caso de oclusões momentâneas ou falhas de retorno do sinal, reduzindo lacunas no histórico de monitoramento; e (iii) aplicação do critério estatístico de

3 sigmas (3σ), correspondente a 99,7% de confiança, para identificação e exclusão de outliers.

2.2.2 Procedimento de correção da componente vertical por referência fixa

Identificou-se que parte da variação observada na componente vertical poderia estar associada aos efeitos de refração atmosférica, especialmente em função da grande distância entre a estação e os prismas monitorados. Com o objetivo de verificar essa hipótese e reduzir a influência desse efeito nas leituras, foi adotado um procedimento de correção da componente vertical com base em pontos fixos de referência inseridos no próprio arranjo de monitoramento.

Para os prismas de monitoramento, selecionou-se o prisma PR14 como referência de correção, em razão da consistência apresentada em suas leituras e de sua posição representativa na estrutura. A partir da média das observações obtidas, foi criado um ponto de referência gêmeo, denominado PR14_V. Para os prismas de referência, adotou-se procedimento semelhante, utilizando-se, entretanto, as coordenadas de cadastro, uma vez que a diferença entre os valores aferidos e os previamente cadastrados mostrou-se mínima.

Devido à geometria da estrutura e às diferentes distâncias envolvidas no monitoramento, não foi possível aplicar uma única estratégia de correção para ambos os grupos. Os prismas de referência encontravam-se próximos à estação, enquanto os prismas de monitoramento estavam localizados a aproximadamente 2 km da ETR. Dessa forma, optou-se pela criação de dois grupos distintos de correção, permitindo melhor aderência às diferentes condições geométricas e atmosféricas de cada conjunto.

2.2.3 Procedimento de correção da distância por referência fixa

Como etapa complementar, foi adotada uma estratégia adicional de correção baseada na distância inclinada, por meio da criação de um ponto de referência operacional com valor de distância fixado. Esse procedimento possibilitou o cálculo do PPM, definido como a diferença entre a condição atmosférica medida e aquela calculada a partir das observações, e sua posterior aplicação na correção das distâncias inclinadas dos demais prismas.

Com essa abordagem, foi implementada uma configuração dedicada à correção da componente de distância, proporcionando maior aderência do sistema às condições de campo e maior consistência nas medições realizadas.

3. RESULTADOS OBTIDOS

3.1 Parametrização estatística e definição dos desvios padrão da ETR

A definição dos desvios padrão finais foi realizada com base em uma semana de observação, considerando os dados brutos e o ponto mais distante do arranjo monitorado, de forma a representar uma condição conservadora de avaliação. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 1, contemplando os desvios finais adotados para Hz, V e distância, calculados em termos de 3σ.

Os resultados evidenciaram comportamento significativamente mais crítico na componente vertical, em comparação às demais variáveis observadas, indicando maior suscetibilidade dessa componente a interferências externas associadas à geometria de medição e às

condições atmosféricas.

Com base nesses valores, foi realizada a parametrização do sistema, conforme apresentado na Figura 4.

Tabela 1 - Desvios padrão finais calculados para os parâmetros observados.

Parâmetro	Desvio final (3σ)
Hz (")	2,0499
V (")	28,0782
Distância (mm)	17,2556

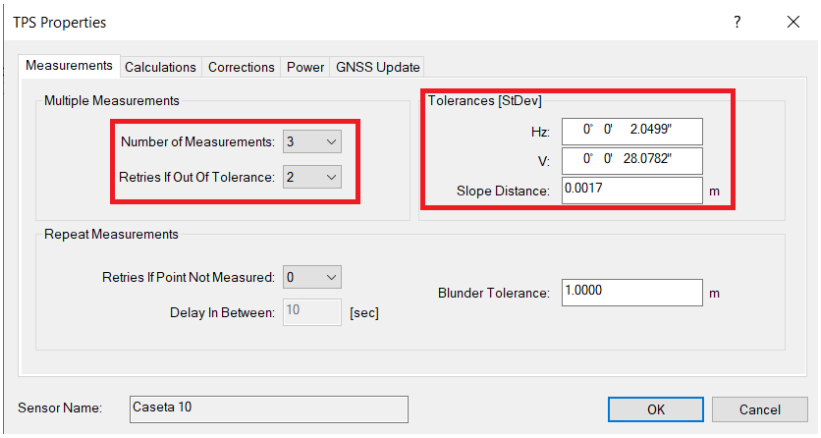


Figura 4 – Parametrização do sistema

Como efeito direto da nova parametrização, observou-se aumento no tempo de ciclo dos prismas de referência e de monitoramento. Após a reconfiguração, o tempo médio de ciclo dos prismas de referência passou a ser de aproximadamente 6 minutos, enquanto o tempo médio dos prismas de monitoramento atingiu cerca de 24 minutos, ou seja, em média, houve triplicação do tempo de ciclo.

Com isso, foi possível reduzir nos parâmetros horizontais, a elevada ocorrência de outliers. Entretanto, para os parâmetros verticais, não foram observadas melhorias significativas, conforme pode ser observado na Figura 5. Ressalta-se que a amplitude geral da variação permaneceu no mesmo patamar, tendo sido removidos apenas os valores atípicos, sem redução efetiva da dispersão do dado.

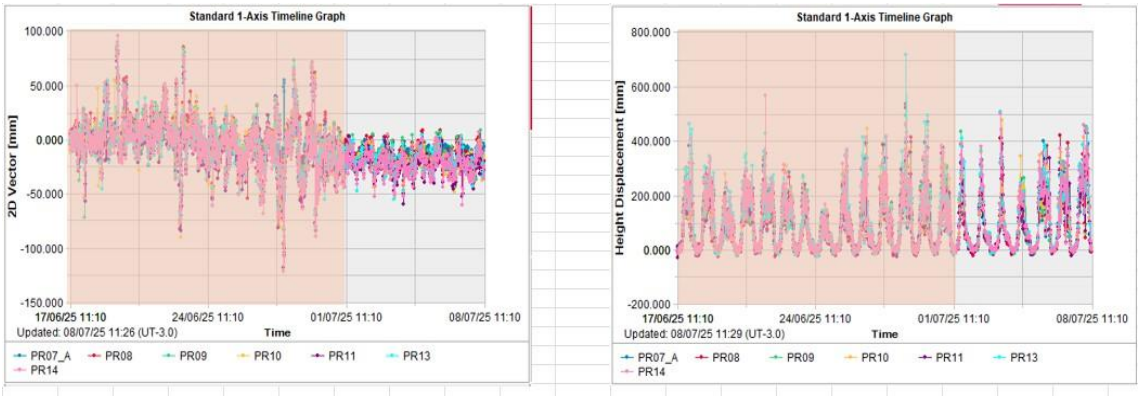


Figura 5 – Resultado da parametrização do sistema

Ao avaliar os possíveis fatores de influência sobre os dados de ângulo vertical, a hipótese de dilatação térmica do pilar da estação foi considerada pouco significativa. Essa interpretação decorre do fato de que, na mesma janela temporal em que se observa aumento de temperatura, os dados de tilt acompanham esse comportamento, evidenciando resposta compatível com a variação térmica. Contudo, ao analisar a componente vertical dos prismas de monitoramento no mesmo intervalo, verifica-se que ela não reproduz o mesmo padrão, conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 6. Essa diferença de comportamento indica que, caso a dilatação térmica do pilar exerça alguma influência sobre as medições, sua contribuição é secundária e insuficiente para explicar, de forma isolada, a amplitude observada nos dados verticais.

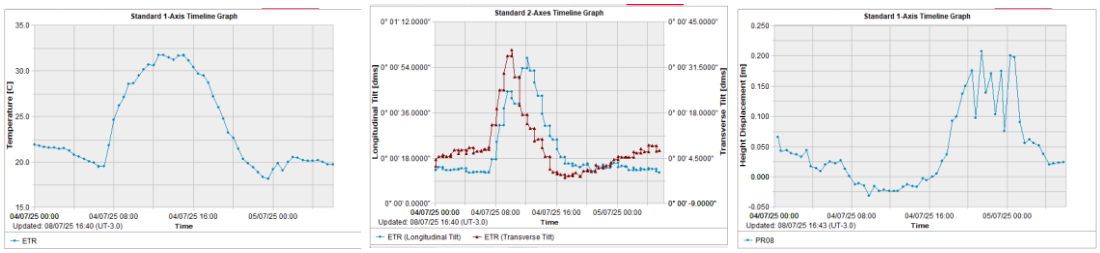


Figura 6 – Relação entre a variação de temperatura, a resposta do tilt longitudinal e transversal da ETR e o comportamento da componente vertical dos prismas no mesmo intervalo de monitoramento

3.2 Resultado do teste de correção do ângulo vertical e da distância

Os resultados obtidos demonstraram que a geometria do arranjo monitorado exigiu a adoção de estratégias distintas de correção, uma vez que os prismas de referência estavam localizados em proximidade da estação, enquanto os prismas de monitoramento se encontravam em condição de longo alcance. Desta forma, foi necessário a criação de dois grupos distintos para correção do ângulo vertical, conforme evidenciado na Figura 7.

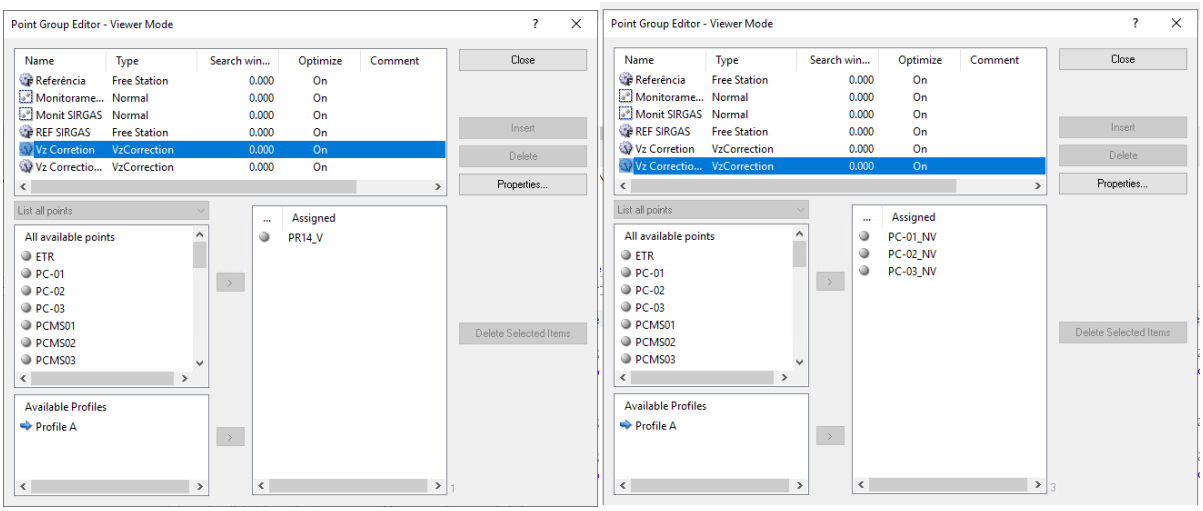


Figura 7 – Criação dos grupos de correção do ângulo vertical

Nesse contexto, a correção da componente vertical foi inserida em dois ciclos independentes de leitura, um para os prismas de referência e outro para os prismas de monitoramento. Para o grupo de referência, adotou-se a sequência composta por leitura do sensor de temperatura e pressão, leitura dos três pontos definidos para a correção do ângulo vertical e leitura dos respectivos prismas. Para o grupo de monitoramento, a sequência operacional passou a ser leitura do sensor de temperatura e pressão, leitura do ponto PR14_V e leitura dos prismas monitorados, permitindo que a atualização das condições atmosféricas e a leitura do ponto de correção antecedesse a aquisição dos dados dos prismas monitorados.

Posteriormente, essa estratégia foi complementada pela leitura do ponto PR14_D para correção da distância inclinada, com o objetivo de reduzir também a influência de variações sistemáticas associadas à componente linear da medição, conforme pode ser observado na Figura 8. Em vez de utilizar diretamente o sensor de temperatura e pressão para a correção da distância, adotou-se como referência a distância fixa do prisma PR14. A partir da medição desse ponto, passou a ser calculado um valor de PPM, correspondente à diferença entre a condição atmosférica medida e a condição atmosférica inferida a partir da distância de referência, o qual é então aplicado na correção da distância inclinada dos demais prismas monitorados.

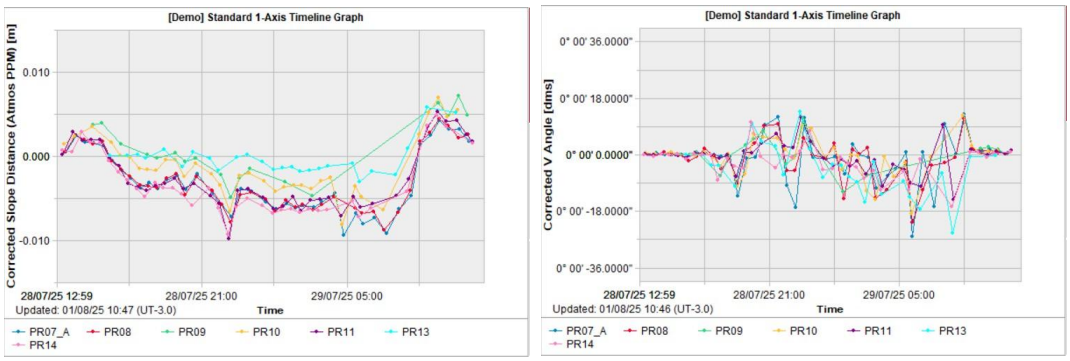


Figura 8 – Dados brutos de distância inclinada corrigida e ângulo vertical corrigido antes da configuração.

A adoção de um ponto de correção da distância inclinada na própria estrutura proporcionou redução da amplitude de variação nos componentes Easting, Northing e Height. Contudo, verificou-se maior incidência de outliers em alguns intervalos, em decorrência da indisponibilidade de leitura do prisma PR14, comprometendo momentaneamente a aplicação consistente da correção, conforme pode ser observado na Figura 9, abaixo.

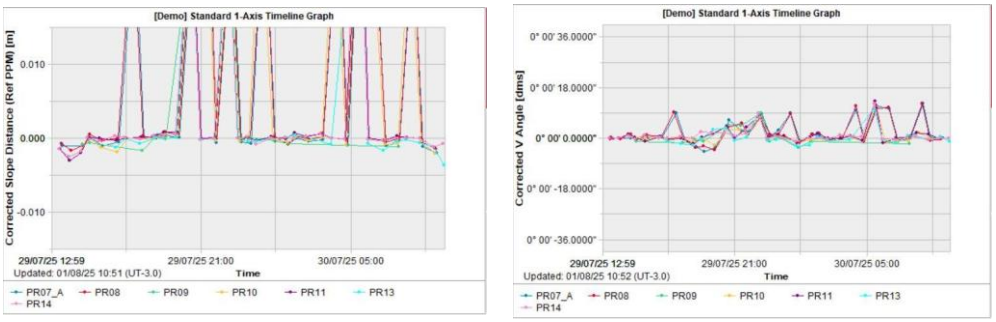


Figura 9 – Dados brutos de distância inclinada corrigida e ângulo vertical corrigido pós configuração

3.3 Ajustes operacionais finais e consolidação da solução adotada

Diante das observações registradas durante o teste de correção pela distância inclinada, foi realizada adequação no sistema, desabilitando-se a correção no ciclo de referência e mantendo-a exclusivamente no ciclo do grupo de monitoramento. De forma complementar, foi habilitada a função de remedição automática dos pontos que não pudessem ser medidos, com o objetivo de assegurar a leitura do ponto de correção antes da leitura dos prismas de monitoramento. As figuras 10 e 11, exibem os gráficos comparativos dos dados brutos de distância inclinada corrigida antes e pós ajustes finais.

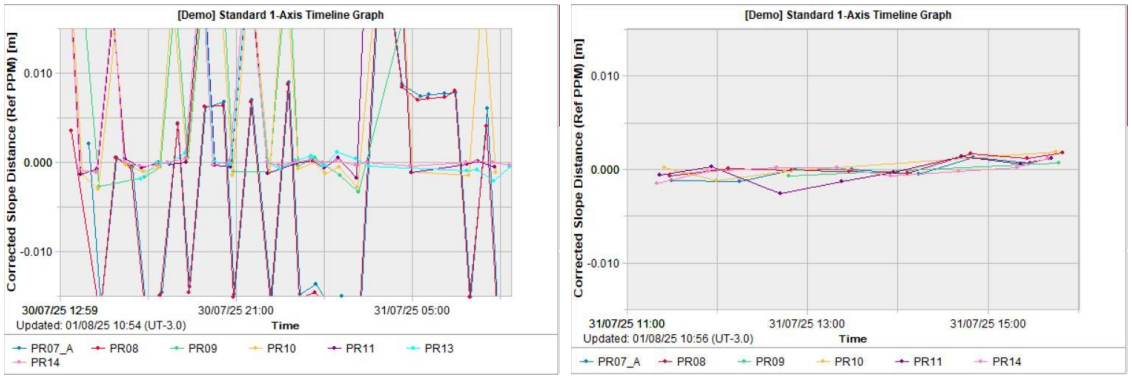


Figura 10 – Dados brutos de distância inclinada corrigida antes e pós ajustes finais

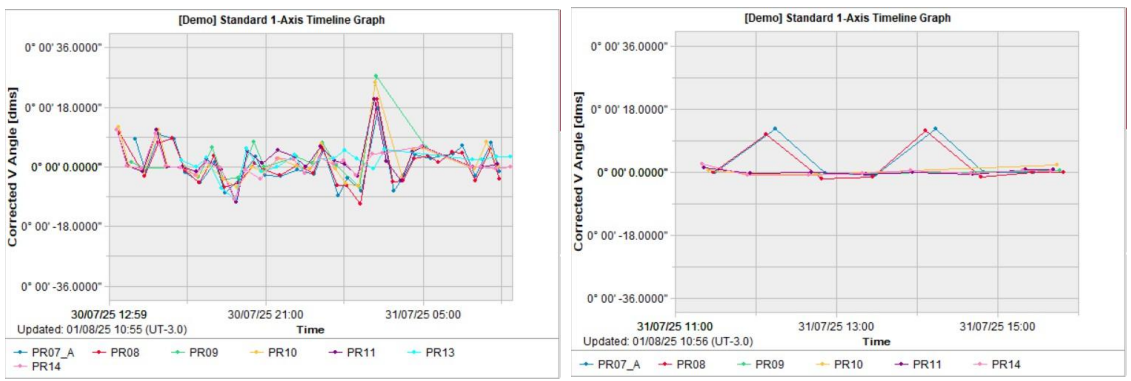


Figura 11 – Dados brutos de ângulo vertical corrigido antes e pós ajustes finais

As figuras 12, 13 e 14 mostram os dados calculados *easting, northing* e *height* antes e pós a última configuração:

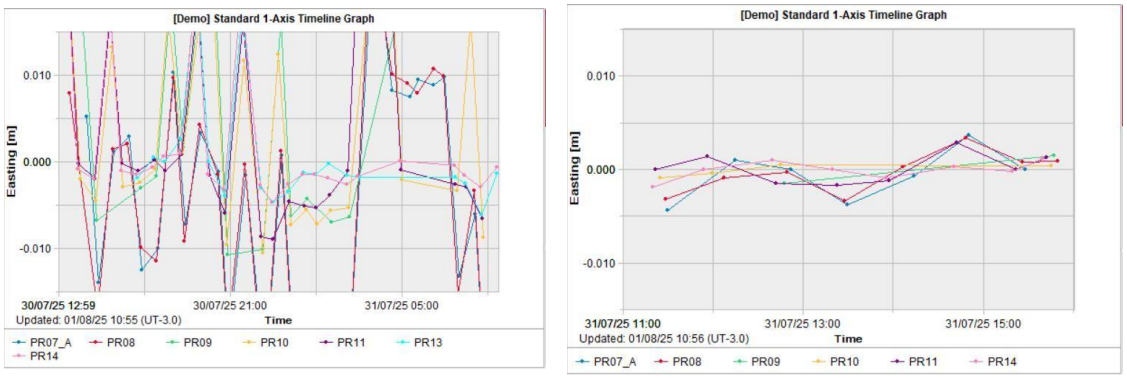


Figura 12 – Dados Easting antes e pós ajustes finais

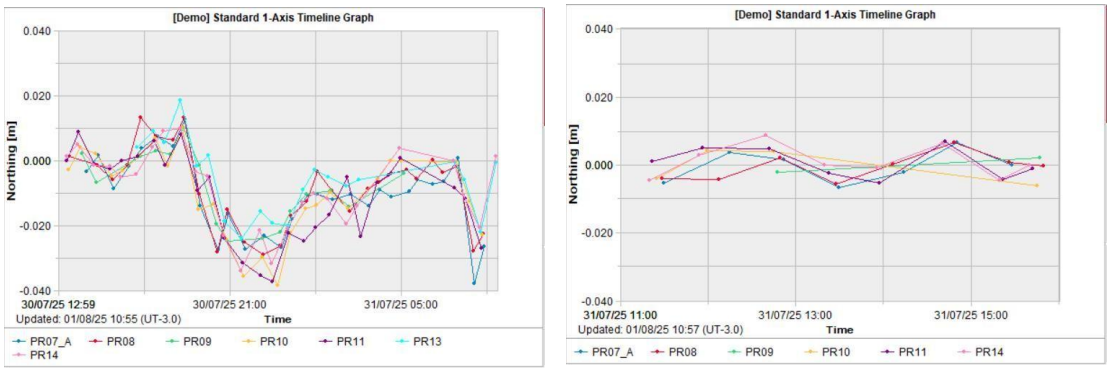


Figura 13 – Dados Northing antes e pós ajustes finais

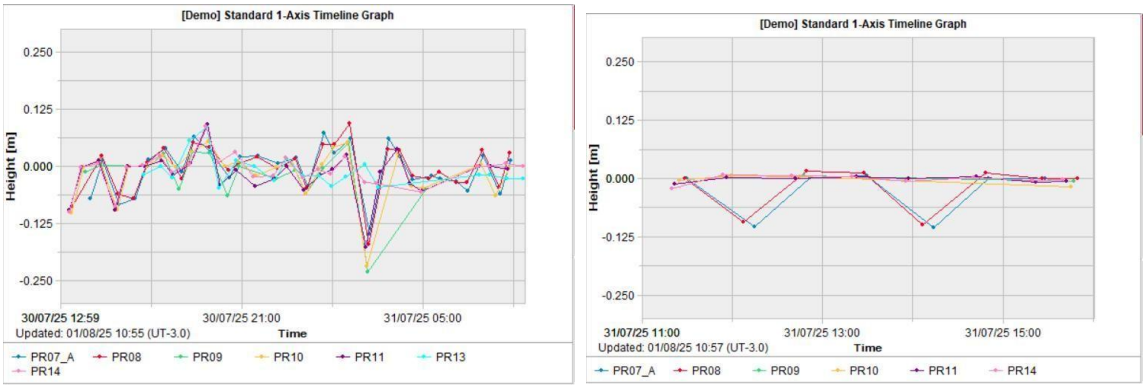


Figura 14 – Dados Height antes e pós ajustes finais

Essa adequação permitiu maior controle sobre a aplicação da correção e maior coerência na sequência operacional de aquisição dos dados, reduzindo a propagação de inconsistências entre ciclos. O período de testes da ETR foi encerrado com o retorno das configurações iniciais de projeto após a consolidação das observações obtidas.

Nas Figuras 15 e 16 são exibidos os gráficos de deslocamento horizontal e vertical de comparação temporal ao longo do teste.

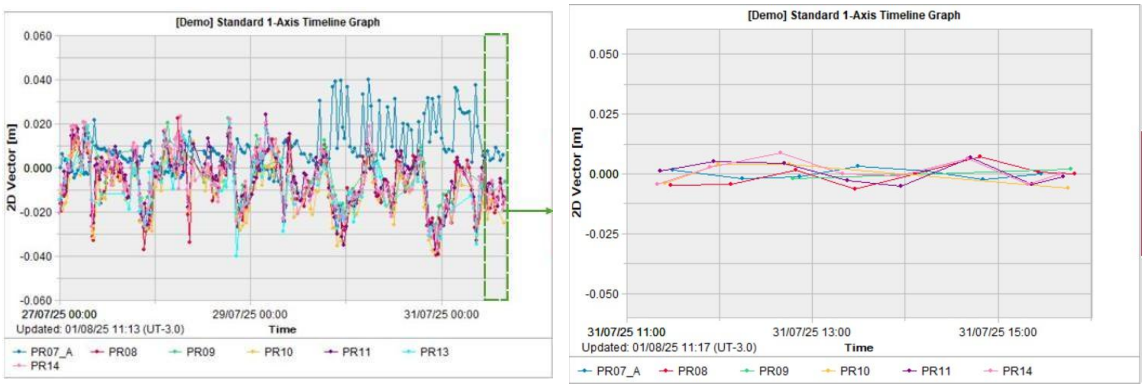


Figura 15 – Dados 2D antes e pós ajustes finais

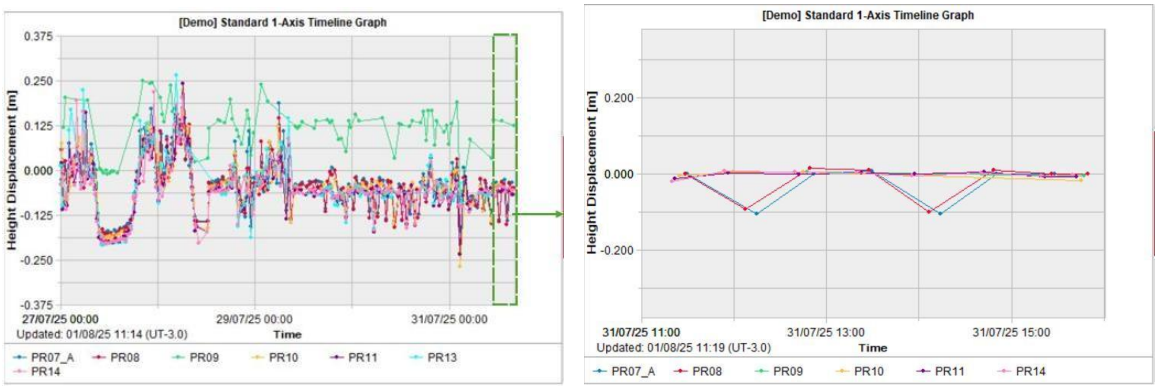


Figura 16 – Dados Height Displacement antes e pós ajustes finais

De modo geral, foi possível observar por meio dos gráficos que as correções implementadas foram efetivas na melhoria da qualidade dos dados, promovendo redução da amplitude de variação em patamar superior a 70% nas componentes horizontal e vertical e tornando as medições mais consistentes.

4. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que, em monitoramentos por ETR de longo alcance, a precisão nominal do equipamento, isoladamente, não é suficiente para garantir a qualidade dos deslocamentos calculados, especialmente na componente vertical. Os resultados evidenciaram que fatores como refração atmosférica, geometria de visada e configuração operacional exercem influência direta sobre a estabilidade das observações.

A adoção de uma parametrização estatística mais robusta, associada à aplicação de correções dedicadas para a componente vertical e para a distância inclinada, proporcionou melhora na consistência dos dados e maior aderência do sistema às condições reais de campo.

Embora o período de operação da ETR sob a configuração final de ajuste tenha sido relativamente curto, a magnitude da redução observada confere relevância técnica aos resultados obtidos. Nesse sentido, entende-se que o teste realizado apresenta caráter promissor e fornece indicativos consistentes quanto à efetividade da estratégia adotada. Os resultados também reforçam a necessidade de implantação física de um prisma específico para correção, uma vez que não é tecnicamente adequado utilizar, para o controle global do sistema, um prisma de monitoramento cuja própria finalidade é registrar possíveis deslocamentos da estrutura. Assim, a adoção de um ponto dedicado, estável e independente tende a conferir maior robustez à metodologia de correção e maior

confiabilidade às medições produzidas pelo sistema.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação da aplicação da metodologia adotada para geometrias distintas, com diferentes distâncias e condições, possibilitando avaliar sua reprodutibilidade e conseguir parametrizar critérios operacionais mais consistentes no monitoramento via estação total robótica.

Adicionalmente, estudos futuros podem aprofundar no desenvolvimento de modelos automaticos de compensação da refração atmósferica, fazendo o uso de variáveis metereologicas a algoritmos para mitigar a alta variabilidade das medições.

5. PALAVRAS-CHAVE

Estação Total Robótica; Monitoramento Geotécnico; Variabilidade de Dados; Fatores Atmosféricos; Correções Geométricas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

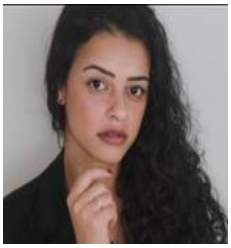
[1] BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 - Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

[2] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022 - Define as medidas regulatórias aplicáveis às barragens de mineração.

[3] DUNNICLIFF, J. (1993) - Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. New York: John Wiley & Sons.

[4] MIKKELSEN, P. E. (2003) - Advances in Inclinometer Data Analysis. Proceedings of the 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Oslo, Norway.

[5] LEICA GEOSYSTEMS. Leica Nova TM60 Data Sheet. Heerbrugg, Switzerland.

	**Gleicilene CASTRO** Engenheira de Processos, com atuação no Centro de Monitoramento Geotécnico com foco em gestão de dados de instrumentação convencional e não convencional aplicada às barragens e estruturas geotécnicas.
	**Paulo NASCIMENTO** Técnico de Instrumentação Sênior, com atuação no Centro de Monitoramento Geotécnico, focado na manutenção, operacionalidade e confiabilidade dos ativos de instrumentação geotécnica, garantindo a disponibilidade dos sistemas de monitoramento aplicados às barragens e demais estruturas geotécnicas
	**Lilian OLIVEIRA** Engenheira Civil, mestre em Geotecnia e especialista em Engenharia de Barragens. Possui experiência no setor mineral, atuando em projetos geotécnicos e na gestão de segurança de estruturas de contenção. Possui expertise em barragens de rejeitos, barragens para geração de energia, pilhas de estéril e rejeito e diques de contenção.
	**Herbert CASTRO** Engenheiro de Controle e Automação, Pós-Graduado em Gestão de Projetos, com sólida trajetória na estruturação de processos operacionais e governança de dados para ativos críticos nos setores de mineração e siderurgia. Atualmente, lidera o Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG), focando na integridade das informações geotécnicas, disponibilidade tecnológica (IT/OT) e a performance dos ativos de monitoramento, garantindo o cumprimento rigoroso de requisitos regulatórios.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

ANÁLISE INTEGRADA DE DADOS GEOESPACIAIS AO DIAGNÓSTICO E À AVALIAÇÃO DE BARRAGENS COMO FERRAMENTA PARA O MONITORAMENTO AMBIENTAL NO ESTADO DO PARÁ

Thales DE SOUZA GARCIA
Gerente – SEMAS-PA

Carla TATIANI DO CARMO PEREIRA
Analista Ambiental – SEMAS-PA

Denys JOSÉ XAVIER FERREIRA
Analista Ambiental – SEMAS-PA

Luan DANIEL SILVA FERREIRA
Analista Ambiental – SEMAS-PA

Luciana OTONI DE SOUZA
Analista Ambiental – SEMAS-PA

RESUMO

A integração de dados geoespaciais aplicada ao monitoramento de barragens constitui principal componente central da metodologia operacional de fiscalização e gestão adotada no estado do Pará, estruturada em etapas sequenciais de análise pré-campo, verificação *in loco* e processamento pós-campo. Este trabalho apresenta o modelo metodológico empregado na consolidação de informações provenientes de bases cartográficas oficiais, imagens de satélite, cadastros institucionais, sistemas de informação geográfica (SIG) e registros técnicos utilizados no acompanhamento de barragens sob jurisdição estadual. A etapa pré-campo inicia-se com o cruzamento geoespacial entre os dados do cadastro estadual e bases hidrográficas, permitindo identificar estruturas existentes e potenciais barramentos não registrados. Em seguida, são definidos critérios de priorização baseados em parâmetros técnicos e regulatórios, incluindo Categoria de Risco (CRI), Dano Potencial Associado (DPA) e histórico de regularização. As inspeções *in loco* complementam a etapa anterior por meio de levantamentos visuais sistemáticos das estruturas, registro de anomalias, coleta de pontos georreferenciados e caracterização das condições físicas dos componentes da barragem. Na fase pós-campo, os dados obtidos são integrados em ambiente SIG, onde são gerados produtos analíticos como perfis altimétricos, mapas temáticos, relatórios técnicos e atualizações nos sistemas oficiais de informação. Os resultados demonstram que a articulação entre análise remota, verificação presencial e sistematização de dados institucionais amplia a capacidade diagnóstica do órgão fiscalizador, possibilitando identificar anomalias estruturais, priorizar ações de fiscalização e direcionar medidas corretivas. Portanto, a integração metodológica de dados geoespaciais constitui instrumento estratégico para a gestão da segurança de barragens, fortalecendo a atuação preventiva, a eficiência operacional e a governança ambiental no âmbito estadual.

ABSTRACT

The integration of geospatial data for dam monitoring is a central component of the operational methodology for inspection and management adopted in the state of Pará, structured into sequential stages of pre-field analysis, on-site verification, and post-field processing.This study presents the methodological model used to

consolidate information from official cartographic databases, satellite imagery, institutional registries, geographic information systems (GIS), and technical records used to monitor dams under state jurisdiction. The pre-field stage begins with the geospatial cross-referencing of data from the state registry and hydrographic databases, allowing for the identification of existing structures and potential unregistered dams. Next, prioritization criteria are defined based on technical and regulatory parameters, including Risk Category (CRI), Potential Associated Damage (DPA), and compliance history.On-site inspections complement the previous phase through systematic visual surveys of the structures, documentation of anomalies, collection of georeferenced points, and characterization of the physical conditions of the dam's components. In the post-field phase, the data obtained are integrated into a GIS environment, where analytical products such as elevation profiles, thematic maps, technical reports, and updates to official information systems are generated. The results demonstrate that the integration of remote analysis, on-site verification, and the systematization of institutional data enhances the regulatory agency's diagnostic capabilities, enabling the identification of structural anomalies, the prioritization of inspection actions, and the targeting of corrective measures. Therefore, the methodological integration of geospatial data constitutes a strategic tool for dam safety management, strengthening preventive actions, operational efficiency, and environmental governance at the state level.

1. INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas dedicadas à retenção de corpo d'água com fluxo controlado utilizadas para diversas finalidades como abastecimento humano e industrial, geração de energia elétrica e irrigação em atividades agrícolas [1,2]. Além disso, são destinadas também para contenção de misturas de líquidos e sólidos [1], como ocorre em barragem de rejeitos. Essas estruturas se distinguem entre si nos projetos, nos procedimentos de construção, nas práticas de operação e no conjunto de regras, normas e leis que controlam e regulam a atividade da barragem, ainda que tenham em comum os fundamentos geotécnicos e hidráulicos [3].

Ainda que essas construções apresentem grande importância para a sociedade, não estão isentas de falhas, podendo haver rupturas que, em situações extremas, liberam grande quantidade de água promovendo acidentes em elevadas proporções nas áreas atingidas [1]. Apesar da crescente atenção dedicada às falhas em barragens de rejeitos de mineração nas últimas décadas, registros históricos evidenciam que barragens destinadas à geração hidrelétrica, à contenção de resíduos industriais, à infraestrutura civil, às obras viárias e ao armazenamento de água para uso agrícola também têm apresentado recorrentes episódios de ruptura, muitos dos quais resultaram em consequências de elevada gravidade [3].

As falhas nas barragens constituem riscos que impactam significativamente, além da sua estrutura, os seres humanos, o meio ambiente, a economia e a sociedade. Tais falhas podem envolver galgamento, erosão, problemas de fundação e liquefação desencadeados por fatores como chuvas extremas, carregamento sísmico, má gestão da água, subestimação do projeto, monitoramento inadequado e defeitos de construção [3].

A fim de evitar acidentes desencadeados por falhas estruturais, foi estabelecida a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) a partir da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que versa sobre a segurança dessas construções, objetivando "manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente" [4].

A segurança de barragens pode ser influenciada por diversos fatores, sendo um deles as mudanças climáticas, que podem afetar negativamente essas estruturas e aumentar o risco de rompimento, uma vez que a maioria delas foi projetada com base em condições climáticas históricas e que estão mudando constantemente [5]. Assim, as mudanças climáticas elevam o risco de falhas na infraestrutura hidráulica de barragens, exigindo o aprimoramento dos projetos para adequação às novas condições climáticas e mitigação dos riscos estruturais [5,6].

Nesse contexto, as geotecnologias têm se consolidado como ferramentas essenciais para o monitoramento ambiental. A integração entre Sistemas de Informações Geográficas (SIG), sensoriamento remoto, bases cartográficas oficiais e bancos de dados geoespaciais permite acompanhar alterações ambientais, processos erosivos, mudanças hidrológicas e áreas suscetíveis a riscos. Desse modo, as análises espaciais e temporais tornam-se mais eficientes, contribuindo para o diagnóstico ambiental e para a gestão preventiva de barragens.

O estado do Pará caracteriza-se pela intensa exploração de recursos naturais, envolvendo atividades de mineração, geração de energia hidrelétrica, agropecuária e utilização de recursos hídricos em grandes proporções. Diante desse cenário, há um aumento na implantação e operação de barragens destinadas tanto ao armazenamento de água quanto à contenção de rejeitos minerais. Entretanto, a expansão dessas estruturas, relacionada às características ambientais e hidrográficas da Amazônia, torna necessário o monitoramento contínuo das condições ambientais e estruturais dessas áreas, como instrumentos da PNSB (Lei nº 12.334).

Vale ressaltar que, desde 2020, com as alterações trazidas pela Lei Federal nº 14.066 à Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), as atribuições de fiscalização do estado do Pará limitaram-se às estruturas destinadas à acumulação de água de sua jurisdição (excetuando as voltadas para geração elétrica), além de barragens para disposição de resíduos industriais. Por outro lado, a responsabilidade pela regulação e fiscalização das barragens de rejeitos decorrentes da atividade mineral pertence à esfera federal, sendo exercida especificamente pela Agência Nacional de Mineração (ANM) [7].

A extensa dimensão do território paraense, somada às dificuldades de acesso a diversas áreas, é desafiadora para os órgãos ambientais e demais instituições responsáveis pela gestão e segurança das barragens. Além disso, o desmatamento, os processos intempéricos e erosivos, o assoreamento dos cursos d'água, as mudanças no uso e cobertura da terra e os eventos hidrológicos extremos podem comprometer a estabilidade do ambiente nas áreas de influência dessas barragens, aumentando os riscos de impactos socioambientais [8].

Portanto, a integração de dados geoespaciais aplicada ao monitoramento de barragens constitui componente central da metodologia operacional de fiscalização e gestão adotada no estado do Pará, estruturada em etapas sequenciais de análise pré-campo, verificação *in loco* e processamento pós-campo, a partir da integração metodológica de dados geoespaciais, constituindo um instrumento estratégico para a gestão da segurança de barragens, fortalecimento da atuação preventiva, da eficiência operacional e da governança ambiental no âmbito estadual.

2. ASSUNTO: MATERIAIS, MÉTODOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1 Materiais

2.1.1 Área de estudo

A área de estudo compreende o estado do Pará, localizado na região Norte do Brasil, entre as latitudes 0° e 9° S e longitudes 46° e 58° W, inserido majoritariamente no bioma Amazônia (Figura 1). O estado apresenta extensa rede hidrográfica, destacando-se as bacias dos rios Amazonas, Tocantins-Araguaia, Xingu, Tapajós e Trombetas, além de elevada disponibilidade hídrica e significativa diversidade socioambiental.

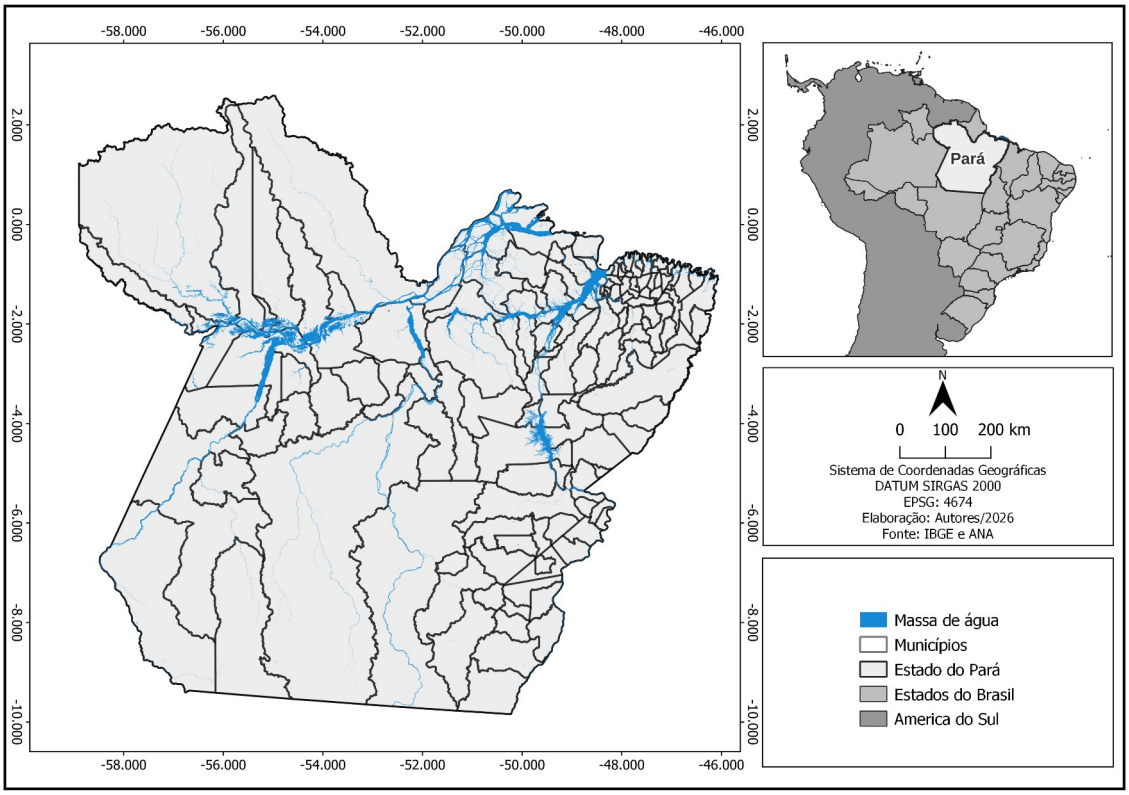


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo (Pará).

O estado possui um número expressivo de barragens destinadas a múltiplos usos, incluindo geração hidrelétrica, abastecimento público, contenção de rejeitos de mineração, irrigação e regularização de vazão [9] e contenção de rejeitos de mineração. A avaliação dessas estruturas fundamenta-se na legislação ambiental vigente, bem como em instrumentos normativos aplicáveis à segurança de barragens (Quadro 1).

Quadro 1 – Critérios e dispositivos legais para aplicação nas campanhas de segurança de barragens no estado do Pará. Fonte: [9]

Instrumento Normativo	Data Publicação	Órgão Emissor	Objetivo/ Descrição	Âmbito (Federal/ Estadual)	Status de atualização (Inferido)
Lei Federal nº 12.334	20/09/2010	Congresso Nacional	Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).	Federal	Alterada pela Lei Federal nº 14.066/2020
Lei Federal nº 14.066	30/09/2020	Congresso Nacional	Altera a Lei nº 12.334/2010 para atualizar a Política Nacional de Segurança de Barragens.	Federal	Vigente
Resolução nº 143	10/07/2012	Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH)	Estabelece critérios gerais de classificação de barramentos por categoria de risco (CRI), dano potencial associado (DPA) e pelo seu volume.	Federal	Vigente
Resolução nº 144	10/07/2012	Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH)	Estabelece diretrizes para implementação da PNSB, aplicação de seus instrumentos e atuação do SNISB.	Federal	Alterada pela Resolução nº 223/2020
Decreto nº 2.804	06/12/2022	Governo do Estado do Pará	Regulamenta o poder de polícia administrativa ambiental para apuração de condutas lesivas ao meio ambiente no Pará.	Estadual	Vigente (Revogou o Decreto Estadual nº 552/2020)
Instrução Normativa SEMAS nº 02	07/02/2018	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS)	Estabelece procedimentos e critérios para elaboração e apresentação do Plano de Segurança da Barragem (PSB).	Estadual	Considerada obsoleta/em processo de atualização devido à Lei 14.066/2020
Instrução Normativa SEMAS nº 12	27/12/2019	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS)	Estabelece periodicidade de execução, qualificação técnica e conteúdo mínimo do Plano de Ação de Emergência (PAE).	Estadual	Considerada obsoleta/em processo de atualização devido à Lei 14.066/2020
Nota Técnica nº 24926/GECAD/ COR/DIREH/SA GRH/2020	23/12/2020	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS)	Estabelece procedimentos para fiscalização de segurança de barragens e critérios para priorizar ações de fiscalização.	Estadual	Vigente
Nota Técnica nº 29432/GECAD/ COR/DIREH/SA GRH/2021	04/10/2021	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS)	Estabelece procedimentos para classificação quanto ao Dano Potencial Associado (DPA) das barragens no Pará.	Estadual	Vigente
Nota Técnica nº 31028/GECAD/ COR/DIREH/SA GRH/2022	08/02/2022	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS)	Estabelece a metodologia de classificação de barragem de acumulação de água quanto à Categoria de Risco (CRI).	Estadual	Vigente

A expansão de empreendimentos associados aos setores mineral, energético e urbano tem intensificado a necessidade de monitoramento ambiental dessas estruturas [8,10], principalmente em áreas ambientalmente sensíveis e próximas a corpos hídricos estratégicos. O clima predominante na região é do tipo equatorial úmido, caracterizado por elevados índices pluviométricos e reduzida amplitude térmica anual, fatores que influenciam diretamente os processos hidrológicos, erosivos e sedimentares relacionados à dinâmica das barragens.

2.1.2 Ferramentas utilizadas

As análises geoespaciais e a elaboração dos produtos cartográficos foram realizadas utilizando o *software* QGIS (versão 3.28.2) e o *Google Earth* Pro. As bases cartográficas, hidrológicas, ambientais e orbitais foram obtidas em plataformas oficiais de domínio público. As informações referentes às barragens foram extraídas do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), contemplando dados de localização, finalidade e características estruturais dos empreendimentos [10].

Os dados de uso e cobertura da terra foram obtidos junto ao projeto MapBiomas. As informações hidrográficas e os limites territoriais foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para a caracterização do relevo, empregou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução espacial de 30 metros.

As imagens orbitais empregadas no monitoramento ambiental foram obtidas pelos satélites Landsat-8/9 e Sentinel-2, selecionadas com base na disponibilidade temporal e na baixa cobertura de nuvens sobre a área de estudo. Todos os dados foram organizados e padronizados em ambiente SIG, adotando-se o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000. O Quadro 2, abaixo, sumariza os principais dados utilizados no georreferenciamento das áreas que compreendem as barragens no estado do Pará.

Quadro 2 – Principais dados de entrada para o georreferenciamento de áreas com barragens no estado do Pará. Fonte: [11].

Tipo de dado	Fonte	Aplicação
Modelo Digital de Elevação (MDE)	SRTM/Topodata	Caracterização do Relevo
Hidrografia	ANA / IBGE	Drenagem e corpos hídricos
Uso e cobertura da terra	MapBiomas	Análise ambiental
Imagens de satélite	Landsat-8/9; Sentinel-2	Monitoramento ambiental
Limites territoriais	IBGE	Delimitação da área
Cadastro de barragens	SNISB/ANA	Identificação das barragens
Informações pluviométricos	INMET	Suporte hidrológico
Dados geológicos	CPRM	Análise de estabilidade

2.2 Métodos

A metodologia adotada neste estudo fundamentou-se no Relatório de Segurança de Barragens do Estado do Pará [11] e na Instrução Normativa SEMAS nº 02/2018 [12], incorporando técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Os dados geoespaciais foram organizados em ambiente SIG utilizando o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000, com o objetivo de garantir a compatibilização cartográfica entre as diferentes bases temáticas.

A análise espacial compreendeu: (i) o georreferenciamento das barragens; (ii) a vetorização e delimitação dos reservatórios, áreas de influência e trechos de drenagem; (iii) a avaliação ambiental do entorno, considerando Áreas de Preservação Permanente (APP), proximidade de áreas urbanas, interferências em corpos hídricos e supressão da vegetação; e (iv) a aplicação de análise multicritério para o diagnóstico ambiental, contemplando variáveis como declividade, uso e cobertura do solo, proximidade da drenagem, vulnerabilidade ambiental, densidade populacional e sensibilidade ambiental.

A metodologia foi estruturada em três etapas sequenciais: análise pré-campo, verificação em campo (*in loco*) e processamento pós-campo. Esse fluxo metodológico (Figura 2) assegura a produção, validação e consolidação das informações necessárias ao monitoramento ambiental e subsidia a fiscalização das barragens mediante a integração de dados provenientes de diferentes fontes. Essa integração constitui uma proposta metodológica operacional para a fiscalização de barragens sob jurisdição estadual.

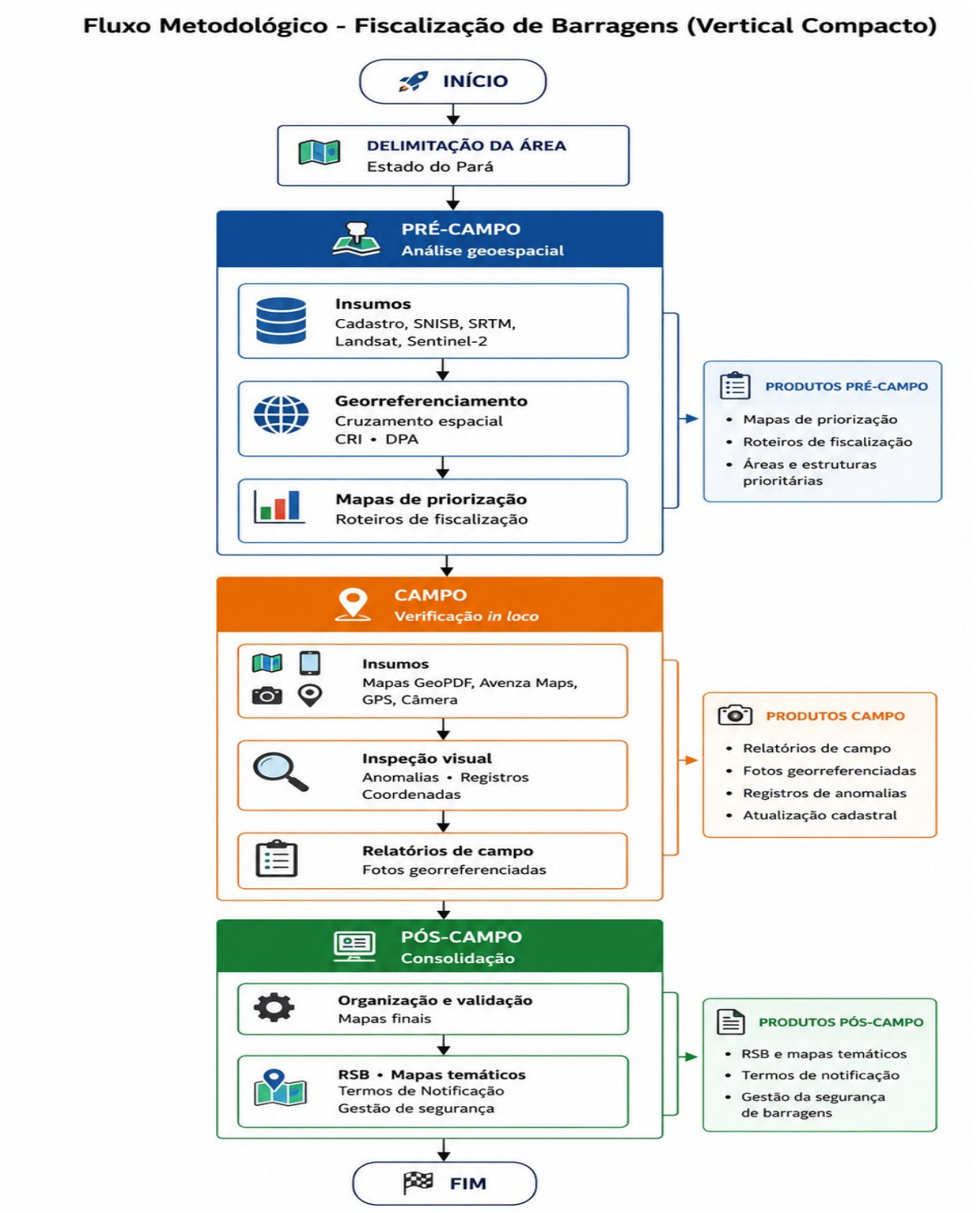


Figura 2 – Fluxograma metodológico da integração de dados geoespaciais aplicada ao monitoramento e à fiscalização de barragens no Estado do Pará.

2.2.1 Análise Pré-Campo

A etapa de análise pré-campo corresponde ao planejamento das ações de fiscalização das barragens de acumulação de águas destinadas a usos múltiplos. Nessa fase são realizados o levantamento das informações cartográficas, a consulta aos sistemas corporativos da SEMAS — especialmente SICAR, SIMLAM e SEIRH — e a análise preliminar das áreas selecionadas para inspeção.

Foram integradas informações provenientes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Clima e Sustentabilidade do Pará (SEMAS) e Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

A base cartográfica do IBGE utilizada compreende, normalmente, o limite territorial do estado do Pará e de seus municípios, principalmente por meio de arquivos vetoriais no formato *shapefile* para a representação da malha territorial. Além disso, são utilizadas também informações da Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo (BCIM) como as localidades e rodovias do estado. A base consultada da ANA é o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), uma das principais da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). O SNISB compila o cadastro de barragens para usos múltiplos da água, geração de energia, contenção de resíduos industriais e rejeitos de mineração, incluindo estruturas sujeitas ou não à legislação (Figura 3). As bases da SEMAS incluem o Sistema Estadual de Informações sobre Recursos Hídricos (SEIRH) para a consulta das outorgas para regularização de vazão, Sistema de Cadastro Ambiental Rural no Pará (SICAR) e dados de hidrografia.

Complementarmente, empregaram-se imagens de satélite de diferentes sensores orbitais, como Sentinel-2 (programa Copernicus/ESA), Landsat 8 e 9 (USGS/NASA), *Google Satellite* e *PlanetScope* que disponibilizam diferentes resoluções espaciais e temporais, permitindo análises multitemporais que abrangem desde séries históricas iniciadas com o programa Landsat até a detecção de alterações de pequena escala por meio das imagens PlanetScope. Todos os dados foram organizados e padronizados em ambiente SIG, adotando-se o sistema de referência geodésico SIRGAS 2000.

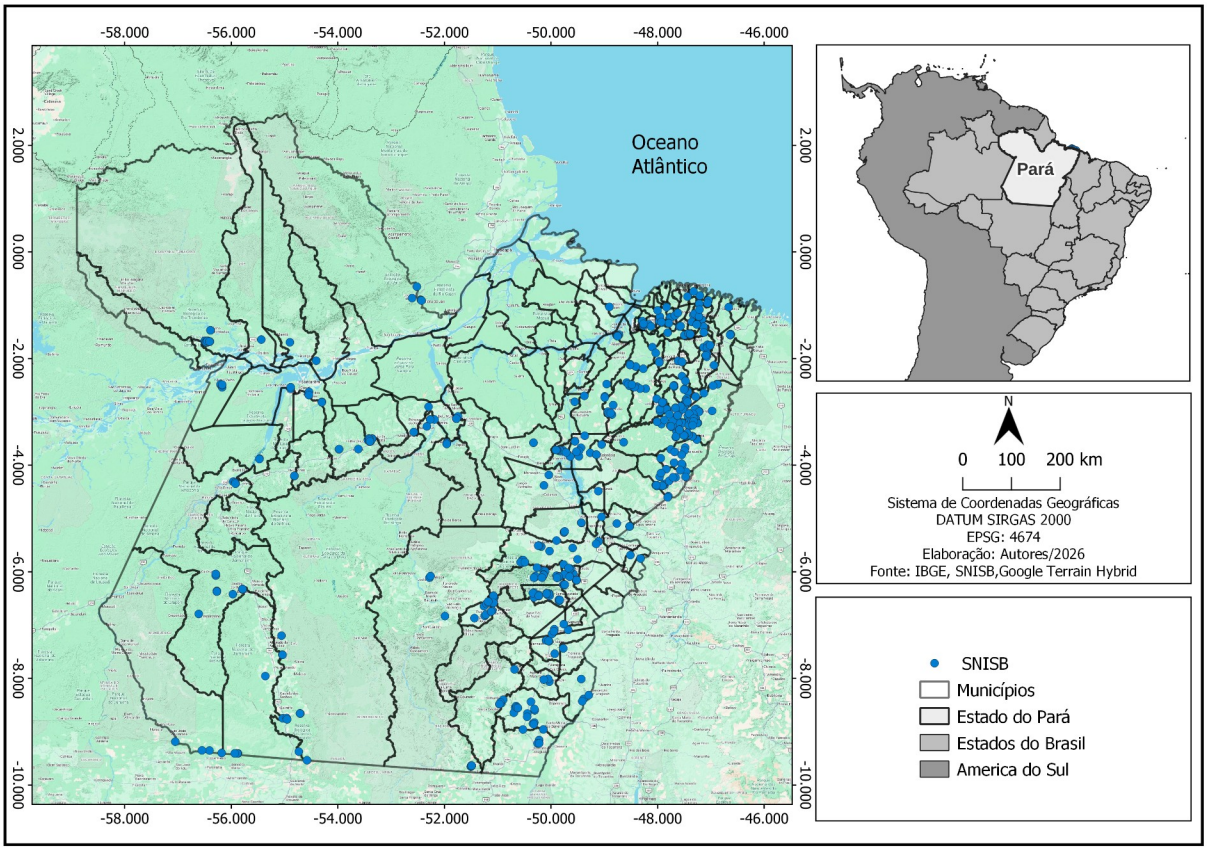


Figura 3 – Mapeamento dos pontos SNISB localizados no estado do Pará.

Nessa etapa, a análise permite identificar inconsistências cadastrais e detectar barragens não registradas, além de subsidiar a classificação das estruturas segundo critérios técnicos e normativos, como a Categoria de Risco (CRI), o Dano Potencial Associado (DPA) e o histórico de regularização dos empreendimentos (Quadro 3). A partir desses parâmetros, foram elaborados mapas temáticos de prioridade que orientaram a seleção das barragens a serem fiscalizadas.

Quadro 3 – Critérios técnicos para priorização das fiscalizações. Fonte: [11].

Critério	Descrição	Peso
Categoria de Risco (CRI)	Avaliação estrutural da barragem	Alto
Dano Potencial (DPA)	Impacto socioambiental potencial	Alto
Regularização	Situação documental	Médio
Histórico de anomalias	Ocorrências registradas	Médio
Localização	Proximidade de áreas sensíveis	Baixo

2.2.2 Verificação em Campo

A etapa de verificação em campo (*in loco*) foi conduzida com base nos resultados da análise pré-campo e incluiu inspeções visuais sistemáticas das barragens previamente monitoradas. Para subsidiar o trabalho de campo, os mapas gerados no *software* QGIS foram exportados em formato GeoPDF e utilizados no

Avenza Maps, aplicativo que permite navegação *offline*, registro de pontos georreferenciados e associação de fotografias e anotações diretamente no mapa.

Durante as inspeções técnicas, foram coletados dados sobre: (i) anomalias estruturais, como fissuras ou trincas, infiltrações e processos erosivos; (ii) condições operacionais, relacionadas ao funcionamento da barragem e de seus sistemas durante a operação; e (iii) registros fotográficos georreferenciados, assegurando a rastreabilidade e a padronização dos dados. Essa etapa garante a validação das informações previamente levantadas e aumenta a confiabilidade dos resultados.

Como exemplo, a estrutura sob o SNISB 34643, na propriedade denominada fazenda João e Maria e localizada no município de Aurora do Pará, com a identificação das anomalias relacionadas a cada componente da barragem e os aspectos dos seus sistemas extravasores (Figura 4).



Figura 4 – Vista da estrutura do sistema extravasor do SNISB 34643 (observação *in loco*).

2.2.3 Etapa Pós-Campo

A última etapa de processamento compreende a consolidação e análise dos dados coletados na etapa anterior, com reintegração ao ambiente SIG. Os registros foram sistematizados no *software* QGIS, permitindo a geração de mapas temáticos, relatórios técnicos e produtos analíticos que sintetizam as condições estruturais das barragens analisadas. Destacam-se os Relatórios de Segurança de Barragens

(RSB), que sistematizam as informações de forma padronizada e subsidiam a tomada de decisão dos órgãos fiscalizadores.

Abaixo, segue mapa pós-campo para o mesmo SNISB citado acima, nele constam geoespacialmente componentes identificados em campo da barragem, além de seu perfil topográfico (Figura 5).

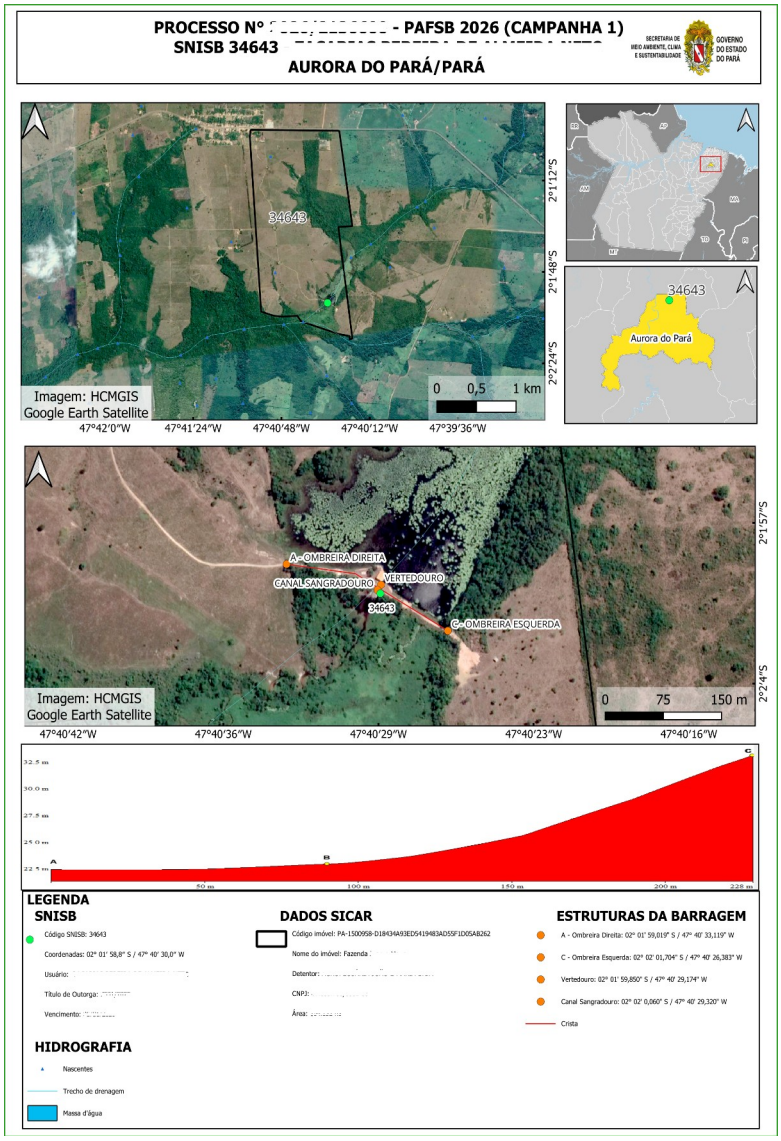


Figura 5 – Mapa pós-campo do SNISB 34643 (observação *in loco*).

Paralelamente, foram emitidos Termos de Notificação conforme o modelo da SEMAS/PA e em conformidade com a Lei Estadual nº 9.575/2022, estabelecendo prazos e obrigações para a regularização das estruturas. Essa etapa subsidia a atuação fiscalizatória, promove o controle e a conformidade das estruturas, além de fortalecer o acompanhamento das barragens, a gestão ambiental e a segurança hídrica no estado do Pará.

2.3 Resultados e discussão

A identificação de estruturas não cadastradas e a atualização de inconsistências em bases institucionais confirmam a relevância da integração de

dados geoespaciais para a gestão da segurança de barragens [14]. Tal resultado está em consonância com o Relatório de Segurança de Barragens 2022, publicado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que destaca a necessidade de aprimorar os sistemas de informação e ampliar a transparência sobre as condições das estruturas no país [15].

O monitoramento realizado em 2024, que alcançou 79 barragens distribuídas em 25 municípios do Pará, demonstra a capacidade da metodologia em subsidiar a priorização de inspeções. Esses achados reforçam a atuação da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS/PA), que tem publicado boletins e relatórios estaduais voltados ao acompanhamento da segurança de barragens e à implementação da Lei Estadual nº 9.575/2022.

A utilização de imagens de satélite, como as fornecidas pelos sensores Sentinel-2 e Landsat 8/9, amplia a capacidade de diagnóstico ao permitir análises multitemporais e a detecção de alterações na paisagem [16]. O projeto Brazil Data Cube (INPE), em desenvolvimento até 2025, tem demonstrado como o uso de grandes volumes de dados de sensoriamento remoto pode fortalecer o monitoramento ambiental e a fiscalização de empreendimentos de risco [17].

Além disso, estudos recentes apontam que o sensoriamento remoto aplicado a barragens é uma ferramenta indispensável para a prevenção de acidentes, permitindo identificar variações na lâmina d'água e anomalias estruturais [14]. Pesquisas publicadas em 2023 na Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto confirmam a eficácia de índices morfométricos e análises geoespaciais para avaliar áreas de inundação e risco associado a barragens de mineração [18].

As evidências obtidas dialogam com iniciativas nacionais voltadas à modernização da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) [19]. Em 2025, o Ministério de Minas e Energia (MME) reforçou a importância da adoção de tecnologias inteligentes, como sensores e algoritmos de inteligência artificial, para tornar mais ágil e confiável a análise de riscos e a tomada de decisão.

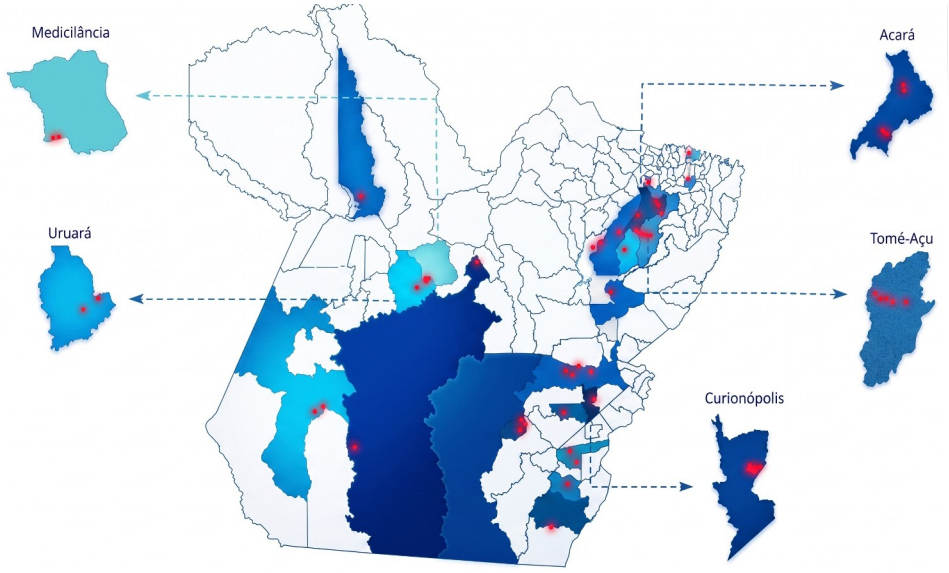


Figura 6 – Distribuição das barragens fiscalizadas em 2024 nos municípios do Pará. Fonte: adaptado de [9].

A priorização baseada nos parâmetros de Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA) mostrou-se decisiva para otimizar as ações de fiscalização, permitindo que os esforços fossem direcionados às barragens com maior potencial de risco. Essa estratégia está alinhada às recomendações da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que em seus relatórios recentes enfatiza a necessidade de priorização de empreendimentos críticos para garantir maior efetividade na gestão da segurança de barragens [20].

As inspeções de campo desempenharam papel fundamental ao validar as análises remotas e identificar anomalias não detectáveis por sensoriamento remoto. Esse resultado reforça a importância da complementaridade entre dados geoespaciais e observações in loco, prática já destacada em estudos sobre monitoramento de estruturas hidráulicas na Amazônia [21].

Outro ponto relevante observado foi a variação no número de barragens não classificadas. Em 2017, havia 74 estruturas nessa condição; em 2022, esse número atingiu um pico de 98, mas reduziu para 46 em 2024. Essa oscilação reflete tanto avanços na classificação quanto desafios persistentes na atualização cadastral. Em contrapartida, o número de barragens não enquadradas apresentou crescimento expressivo, passando de 14 para 81, entre 2017 e 2024, representando um aumento de 478%.

A sistematização dos dados em ambiente SIG favoreceu a padronização das análises e a produção de informações estratégicas para a gestão da segurança de barragens. Esse processo permitiu consolidar diferentes bases institucionais e gerar indicadores consistentes sobre o enquadramento das estruturas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Conforme demonstrado, a maioria das barragens (301; 68,3%) apresenta Dano Potencial Associado (DPA) médio ou alto, o que indica elevado impacto potencial em caso de falha (Figura 5). Esse resultado reforça a necessidade de medidas preventivas e de fiscalização contínua. Essas diretrizes estão em consonância com as recomendações da ANA [20], que destaca a importância da priorização de empreendimentos com maior risco associado.

A análise também revelou que 227 barragens estão classificadas com Categoria de Risco (CRI) alto, representando mais da metade do total. Esse dado sugere que tais estruturas demandam atenção prioritária com protocolos de segurança mais rigorosos e inspeções frequentes. Estudos recentes apontam que a integração de dados geoespaciais e a classificação de risco são fundamentais para orientar políticas públicas e reduzir a vulnerabilidade socioambiental em regiões de intensa atividade minerária e energética, como demonstrado no caso do Pará [22].

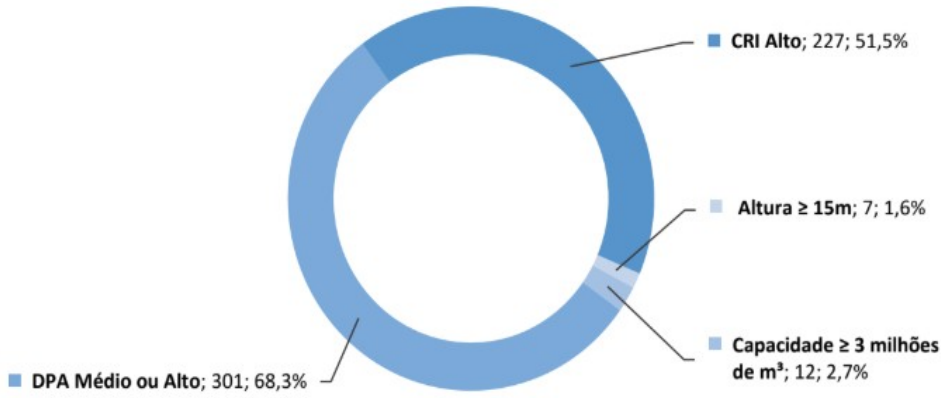


Figura 7 – Distribuição das barragens fiscalizadas em 2024 nos municípios do Pará, por características de enquadramento na PNSB. Fonte: adaptado de [9].

Outro aspecto relevante é a predominância de barragens de menor porte no Pará. Apenas sete apresentam altura superior a 15 metros, e doze possuem capacidade acima de 3 milhões de metros cúbicos. Essa distribuição reflete a diversidade de usos das barragens na região, muitas delas voltadas ao abastecimento local ou a atividades agropecuárias. Ainda que sejam, em grande parte, estruturas de pequeno porte, podem gerar impactos significativos em caso de falha, o que ressalta a necessidade de uma fiscalização abrangente, independentemente do porte da estrutura.

Até o ano de 2024, foram registradas 619 barragens no Pará, distribuídas entre diferentes órgãos fiscalizadores: SEMAS/PA, ANA (8 barragens), ANEEL (53 barragens) e ANM (117 barragens). Essa diversidade institucional evidencia a complexidade da gestão integrada das barragens, exigindo interoperabilidade entre sistemas e padronização de dados e informações.

4. CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que a integração entre tecnologias de geoprocessamento, dados geoespaciais e procedimentos de fiscalização constitui uma abordagem metodológica eficaz para o fortalecimento da gestão da segurança de barragens no estado do Pará. As principais contribuições deste estudo podem ser sintetizadas nos seguintes aspectos:

1. A análise integrada em ambiente SIG permite a espacialização das anomalias e a correlação entre variáveis estruturais e territoriais, evidenciando padrões de distribuição associados à ocupação do solo e à dinâmica hidrológica regional. Essa abordagem possibilita a transição de uma fiscalização reativa para uma estratégia preditiva, alinhada às diretrizes internacionais de segurança de barragens.

2. A integração de dados geoespaciais aplicada à fiscalização de barragens no Estado do Pará demonstrou ser uma abordagem eficaz para o aprimoramento da gestão da segurança dessas estruturas. A metodologia

contribui para o aumento da eficiência operacional, fortalecimento da atuação preventiva e melhoria da governança ambiental.

3. Destaca-se que a articulação entre análise remota, verificação em campo e sistematização de dados institucionais constitui um instrumento estratégico para a mitigação de riscos e proteção de populações e ecossistemas.

4. Além dos resultados obtidos no estado do Pará, a metodologia apresentada possui potencial de adaptação para outros órgãos gestores responsáveis pela fiscalização de barragens, especialmente em regiões caracterizadas por grandes extensões territoriais e limitações operacionais. A integração entre geotecnologias, bases institucionais e inspeções de campo representa uma estratégia promissora para o aprimoramento contínuo da segurança de barragens e para o fortalecimento da governança ambiental.

5. PALAVRAS-CHAVE

Barragens; Monitoramento ambiental; estado do Pará.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PERINI, D. S. (2009) – Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

[2] PEREIRA, R. C.; STUDART, T. M. C. (2025) – Segurança de barragens e a borda livre: uma revisão sistemática das abordagens e evoluções metodológicas. Revista Brasileira de Geografia Física, 18(3): 2157–2177.

[3] PEREIRA, A. C. (2026) – Revisão global comparativa de falhas de barragens: rejeitos de mineração versus barragens hidrelétricas, industriais e civis — causas, mecanismos e lições aprendidas. RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar, 7(1): e717147.

[4] BRASIL. (2010) – Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010: institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Brasília: Presidência da República.

[5] CARNEIRO, B. L. D. S.; SOUZA FILHO, F. A.; CARVALHO, T. M. N.; RAULINO, J. B. S. (2022) – Hydrological risk of dam failure under climate change. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 27: 19.

[6] FURTADO, F. A. (2024) – Avaliação do impacto das mudanças climáticas na segurança de barragens: estudo de caso da Barragem Banabuiú. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

[7] BRASIL. (2020) – Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020: altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Brasília: Presidência da República. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm (acesso em 9 jul. 2026).

[8] ROMÃO, P. A.; NASCIMENTO, D. T. F.; SALES, M. M.; LUZ, M. P. (2022) – Modelagem da suscetibilidade erosiva laminar e linear no entorno de reservatórios de usinas hidrelétricas. Caminhos de Geografia, 23(89): 34–56.

[9] SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE (SEMAS). (2024) – Relatório Estadual de Segurança de Barragens do Estado do Pará – 2024. Belém: SEMAS.

[10] CASTRO, Matheus Lima; VICHETE, W. D. 2026. METBRA25Y: Arquivo de Meteorologia de Superfície do Brasil com Variáveis Harmonizadas e Controle de Qualidade. **arXiv preprint arXiv**:2605.08701.

[11] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). (2026) – Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Brasília: ANA.

[12] PARÁ. SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE (SEMAS). (2025) – Relatório de Segurança de Barragens do Estado do Pará. Belém: SEMAS.

[13] PARÁ. SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE (SEMAS). (2018) – Instrução Normativa SEMAS nº 02, de 07 de fevereiro de 2018: dispõe sobre o Plano de Segurança da Barragem de Acumulação de Água e de Disposição de Resíduos Industriais (PSB). Diário Oficial do Estado do Pará, nº 33.554.

[14] FERREIRA, H. S. (2025) – Análise de risco associada a barragens de usos múltiplos na bacia hidrográfica do rio Uraim em Paragominas-PA, utilizando ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Gestão de Risco e Desastre na Amazônia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, PA.

[15] DE CLASSE, Tadeu Modeira; DE SÁ SOUSA, Henrique Prado; DE CASTRO, Ronney Moreira. 2023. Sistemas de Informação Podem Ajudar no Combate à Corrupção Através de Recursos de Transparência? Mapeamento Sistemático da Literatura. iSys-Journal of Information Systems, v. 16, n. 1, p. 4: 1-4: 33.

[16] LIMA, Asheley Aicha da Silva. (2025) – Utilização de imagens LANDSAT 7 e 8 e SENTINEL-2 para monitoramento agrícola, análise de desmatamento e uso da terra: um estudo de caso no médio Parnaíba Piauiense. Monografia (Graduação em Ciências Ambientais), Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 50 p.

[17] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). (2025) – Metodologia do Sistema PRODES Mata Atlântica – Edição 2023. Relatório Técnico. São José dos Campos, SP: INPE. 49 p.

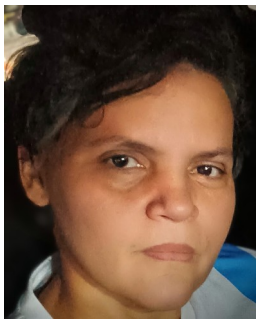
[18] FERREIRA, A. B. R. (2023) – Geotecnologias e métodos de representação espacial no estudo de áreas de risco de inundação e movimento de massa: análise integrada de São João del-Rei/MG (Brasil). Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, SP. 218 p.

[19] GOMES, I. T. (2025) – Evolução da Política Nacional de Segurança de Barragens: avanços, desafios, oportunidades e sua implicação para as barragens de rejeitos de mineração em Minas Gerais. Trabalho Final de Curso de Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias, Montes Claros, MG. 50 f.

[20] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). (2023) – Relatório de Segurança de Barragens 2022. Brasília: ANA. Disponível em: https://www.gov.br/ana (acesso em 9 jul. 2026).

[21] SILVA, J. R.; SOUZA, M. A. (2022) – Monitoramento de barragens na Amazônia: integração entre dados geoespaciais e inspeções de campo. Revista Brasileira de Geografia Física, 15(3): 512–528.

[22] SILVA, A. L. (2024) – Análise integrada de governança e geotecnologias para a conservação e gestão ambiental do alto curso da sub-bacia do rio Tibiri em Santa Rita-PB. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, PB. 73 p.

	**Thales DE SOUZA GARCIA** Engenheiro Ambiental e de Segurança do Trabalho. Especialista em Geociências e Geotecnologias, Gestão, Auditoria, Perícia e Licenciamento Ambiental e MBA em Gestão da Qualidade. Atualmente, exerce o cargo de Gerente na Diretoria de Monitoramento Ambiental (DIMAM), na Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Clima e Sustentabilidade (SEMAS).
	**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 (SEMAS) e coordena a equipe de fiscalização de segurança das barragens sob responsabilidade do Estado.
	**Denys JOSÉ XAVIER FERREIRA** Biólogo, doutor em Ciências Ambientais pela Universidade Federal do Pará (UFPA), mestre em Geociências pela Universidade Federal do Pará (UFPA), especialista em Currículo e Prática Docente nos Anos Iniciais do Ensino Fundamental (UFPI). Atualmente, exerce o cargo de Analista Ambiental na Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Clima e Sustentabilidade (SEMAS).
	**Luciana OTONI DE SOUZA** Engenheira Sanitarista e Ambiental e de Segurança do Trabalho, especialista em Gestão Ambiental e Manejo de paisagem, mestra em Engenharia Civil e Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, doutora em Ciência - Desenvolvimento Socioambiental. Atualmente, exerce o cargo de Analista Ambiental na Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Clima e Sustentabilidade (SEMAS).

	**Luan DANIEL SILVA FERREIRA** Biólogo, formado pela UFRA e UNAMA, com especialização em Microbiologia e Imunologia pela ESAMAZ. Mestre em Genética e Biologia Molecular pela UFPA, atualmente cursa doutorado em Ciências Ambientais. Atua como Analista ambiental na SEMAS e pesquisa filogenia, diversidade microbiana e modelagem molecular.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO EM BARRAGENS E A INFLUÊNCIA DA PLUVIOMETRIA NA LINHA FREÁTICA

Iara MOREIRA
Engenheira de Minas - CSN Mineração

Laura SILVA
Engenheira Ambiental – CSN Mineração

Maria Luiza VIEIRA
Engenheira Civil - Elera Renováveis

Ewerton CRUZ
Engenheira Ambiental – CSN Mineração

RESUMO

O monitoramento geotécnico de barragens constitui uma etapa fundamental para assegurar a estabilidade estrutural e a segurança operacional delas, especialmente diante da influência de processos de infiltração e das variações no regime hidrológico. A interpretação conjunta dos dados obtidos por instrumentação geotécnica, e dos dados de precipitação, possibilita a identificação de alterações significativas na posição da linha freática, bem como a ocorrência de possíveis mecanismos de percolação preferencial ou anomalias no fluxo subterrâneo, frente às precipitações sazonais e a eventos extremos. Nesse contexto, este artigo avalia o desempenho geotécnico de uma barragem por meio da análise integrada do perfil da linha freática e da influência da pluviometria no comportamento hidráulico da fundação. Para isso, foi realizada uma análise sistemática dos dados de monitoramento, correlacionando os registros instrumentais com os índices pluviométricos, a fim de compreender a dinâmica hidráulica e seus reflexos no comportamento geotécnico da estrutura. Os resultados indicam que os instrumentos responderam de forma satisfatória e coerente às variações sazonais, enquanto a análise de percolação confirmou a eficiência do sistema de drenagem, sem evidências de anomalias na estrutura.

ABSTRACT

The geotechnical monitoring of dams constitutes a fundamental step to ensure their structural stability and operational safety, especially in the face of the influence of infiltration processes and variations in the hydrological regime. The joint interpretation of data obtained from geotechnical instrumentation and precipitation data enables the identification of significant changes in the position of the water table, as well as the occurrence of possible preferential percolation mechanisms or

anomalies in underground flow, due to seasonal rainfall and extreme events. In this context, this article evaluates the geotechnical performance of a dam through the integrated analysis of the water table profile and the influence of rainfall on the hydraulic behavior of the foundation. For this purpose, a systematic analysis of monitoring data was carried out, correlating instrumental records with rainfall indices in order to understand the hydraulic dynamics. For this purpose, a systematic analysis of the monitoring data was carried out, correlating the instrumental records with the rainfall indexes in order to understand the hydraulic dynamics and their effects on the geotechnical behavior of the structure. The results indicate that the instruments responded satisfactorily and consistently to seasonal variations, while the percolation analysis confirmed the efficiency of the drainage system, with no evidence of anomalies in the structure.

1. INTRODUÇÃO

Abordar a temática de segurança de barragens no Brasil, está intrinsicamente relacionado com os acidentes ocorridos no passado recente com barragens de rejeito e suas consequências legais. Consequências essas que vão além da reparação ambiental e social dos danos causados, mas que resultaram em alterações nas legislações já existentes e na criação de uma cultura de monitoramento mais alerta, que a partir da Lei nº 14.066/2020 alterou profundamente a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) [1] e exigiu a implementação de sistemas de monitoramento automatizados e em tempo real para estruturas de médio e alto risco.[2]

Diante deste cenário, a Agência Nacional de Mineração (ANM) publicou a Resolução ANM nº 95/2022, que em seu Art. 2º, XII, definiu como que a Lei 14.066/2020 seria aplicada, a partir da conceituação de Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG) enquanto um “ambiente físico projetado, estruturado e dedicado exclusivamente ao monitoramento de barragens e acionamento dos dispositivos de alerta e alarme”.[3] Logo, a criação de um espaço para monitoramento geotécnico de barragens passou a ser obrigatório. A Resolução ainda direciona o funcionamento do CMG, que tem por atividade fim o tratamento e análise de dados “advindos da instrumentação, câmeras e demais dispositivos inerentes à segurança das barragens, objetivando intervenção célere e imediata quando necessário, com operação ininterrupta 24 (vinte e quatro) horas por dia;” [3]

Fonseca (2003) apresenta que a auscultação de uma barragem é o “conjunto de processos que visam a observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que constituem risco potencial às condições de sua segurança global”, e ela pode ser feita por meio de inspeções visuais (vistorias de campo) e por meio de instrumentação. [4]

A instrumentação geotécnica de barragens envolve a obtenção, registro e o processamento de dados obtidos através dos instrumentos que estão instalados no aterro ou na fundação das barragens. [4]

Para uma instrumentação geotécnica eficaz, é importante compreender qual fenômeno físico se deseja medir. Para o monitoramento de deslocamentos e deformações, são utilizados instrumentos como os marcos superficiais e os

inclinômetros. Para a medição de poropressão e percolação, que é o comportamento da água no interior do maciço e da fundação visando o controle da linha freática, são utilizados os Piezômetros (PZs), os Indicadores de Nível d'água (INAs) e os Medidores de Vazão (MV) na saída dos drenos de fundo.

O presente estudo buscou avaliar a convergência das variáveis que medem o comportamento da água no interior da barragem, correlacionando os registros instrumentais com os dados pluviométricos, com o objetivo de compreender o impacto desta dinâmica no comportamento geotécnico de uma barragem de terra.

2. INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DA PERCOLAÇÃO

A percolação é o movimento de um fluido através do maciço da barragem. Ela é importante para aferir a capacidade do solo para drenam um fluido. À medida que o fluido percola e ocupa os vazios do solo, ela gera uma força interna chamada poropressão. A poropressão, representa um dos elementos mais críticos na avaliação da estabilidade de taludes em barragens de rejeito, pois exerce papel decisivo na redução da resistência efetiva dos materiais. Neste sentido, é uma variável intrinsecamente ligada ao regime hidráulico da estrutura. [5]

O monitoramento geotécnico acompanha a percolação (através de medidores de vazão) e a poropressão (através de piezômetros) de forma simultânea, pois um aumento na velocidade da percolação pode elevar as poropressões, reduzindo a estabilidade das estruturas. Em barragens de terra, o controle do regime de percolação através do maciço é realizado por meio da diferença granulométrica dos materiais que compõe o corpo da barragem, e principalmente pelo funcionamento efetivo da drenagem interna. [4,5]

Entre as principais consequências de problemas relacionados a falhas no controle da percolação em barragens, estão as surgências, que é visível pela saturação de áreas externas do maciço. Em cenários mais críticos, a percolação descontrolada pode desencadear processos de erosão interna (sufusão, *piping*), comprometendo progressivamente a integridade do maciço, reduzindo sua estabilidade e, em casos extremos, levando ao colapso estrutural da barragem. [6]

Além dos piezômetros (PZ), para monitoramento da poropressão, e dos medidores de vazão (MV), para monitoramento da percolação, são utilizados indicadores de nível d'água (INA), para monitorar a posição da linha freática no maciço e na fundação. Sua leitura é realizada de forma direta por meio de um cabo graduado com sensor elétrico, que detecta instantaneamente a superfície da água na estrutura.

3. CORRELAÇÃO ENTRE PERCOLAÇÃO, LINHA FREÁTICA E PRECIPITAÇÃO

Pinheiro (2011) explica o balanço hídrico de um reservatório formado por uma barragem através do fluxo de água entre o reservatório e o maciço, e entre o reservatório e a atmosfera. As entradas de água ocorrem por precipitação direta sobre o espelho d'água e pelas vazões afluentes provenientes da bacia de contribuição. Após ingressar no reservatório, parte desse volume percola através do maciço e de

sua fundação em decorrência dos gradientes hidráulicos estabelecidos. As saídas de água do sistema compreendem a vazão descarregada pelas estruturas extravasores, a água coletada pela drenagem interna e as perdas por evaporação. Em período chuvoso, a componente da precipitação atua de forma direta sobre a superfície do reservatório. [6][7]

A resposta da linha freática aos eventos de precipitação apresenta uma defasagem temporal natural, uma vez que a água infiltrada necessita percolar através da zona não saturada até alcançar os níveis saturados do maciço. Dessa forma, as variações piezométricas normalmente não ocorrem simultaneamente aos eventos de chuva, mas após um intervalo de tempo dependente das características hidráulicas do meio, como permeabilidade, porosidade e espessura da zona não saturada. Freeze e Cherry (1979) destacam que as oscilações do nível freático frequentemente apresentam atraso em relação aos eventos de precipitação, devido ao tempo necessário para a movimentação da água de recarga até o aquífero [8].

Estudos mais recentes também demonstram que os níveis de água subterrânea apresentam resposta retardada às condições meteorológicas, evidenciando a existência de um efeito de defasagem entre precipitação e comportamento piezométrico [9]. Portanto, a avaliação da influência das chuvas sobre a linha freática deve considerar a análise conjunta entre precipitação acumulada e dados de instrumentação, permitindo compreender adequadamente a influência das variações sazonais sobre o regime de poropressões e as tensões efetivas do solo.

4. METODOLOGIA

4.1 Descrição da estrutura

A barragem analisada neste estudo foi construída com a finalidade de armazenar rejeitos provenientes do beneficiamento de minério de ferro em uma mina situada no Quadrilátero Ferrífero. A operação de lançamento de rejeitos foi encerrada em 2018 e, atualmente, o reservatório retém sedimentos gerados na bacia de contribuição.

A construção da barragem iniciou em 1978, e ocorreu em quatro etapas com diques alteados para a montante, sobre o rejeito do reservatório. O maciço atual foi construído em material terroso compactado, com desnível máximo de 65,0 m. Os sistemas de drenagem interna dos diques de alteamento são independentes do construído na etapa anterior; sendo constituídos por filtro septo de areia interligado a um tapete drenante também de areia.

O monitoramento geotécnico do nível d'água é realizado por INAs, PZs e medidores de vazão. A Tabela 1 apresenta as informações técnicas dos INAs e PZs que foram objetos deste estudo, a Figura 1 apresenta a localização de instalação destes instrumentos. A Figura 2 apresenta a legenda dos materiais presentes na barragem.

Tabela 1: Instrumentos instalados na estrutura

Seção	Instrumento	Material de instalação	Cota de fundo (m)	Profundidade (m)
A-A	INA-10	Rejeito e Solo Residual de Filito	930,67	19,76
	IN-14	Aterro - 3° Alteamento	948,70	6,89
	INA-15	Aterro - 3° Alteamento, Lastro e Solo Residual de Filito	940,16	10,71
B-B	INA-11	Rejeito	932,43	18,63
	INA-12	Rejeito	931,70	19,27
	INA-07	Aterro - 3° Alteamento	946,44	9,03
	INA-08	Aterro - 3° Alteamento	946,38	8,95
	PZ-101	Aterro - 3° Alteamento, Lastro, Rejeito	940,49	15,03
	PZ-104	Aterro - 2° Alteamento, Aterro – 1° Alteamento, Rejeito	927,71	21,00
	INA-16	Berma de rejeito, Aterro - 1° Alteamento	931,40	17,14
	PZ-04	Berma de rejeito, Berma de estabilização, Dique de Partida	929,78	12,80
C-C	INA-13	Rejeito	928,61	22,21
	INA-17	Aterro - 3° Alteamento	948,62	6,89
	PZ-103	Aterro - 3° Alteamento, Lastro, Rejeito	939,86	15,63
	INA-18	Aterro – 2° Alteamento, Lastro	938,93	10,85
	PZ-106	Aterro – 2° Alteamento, Aterro – 3° Alteamento, Rejeito	928,11	21,10
	INA-19	Berma de estabilização, Berma existente	930,10	9,79
	PZ-107	Berma existente, Rejeito	918,66	17,77
D-D	INA-20	Aterro – 1° Alteamento, terro – 2° Alteamento	944,07	10,66

Seção	Instrumento	Material de instalação	Cota de fundo (m)	Profundidade (m)
	INA-21	Aterro – 2° Alteamento	942,72	8,99

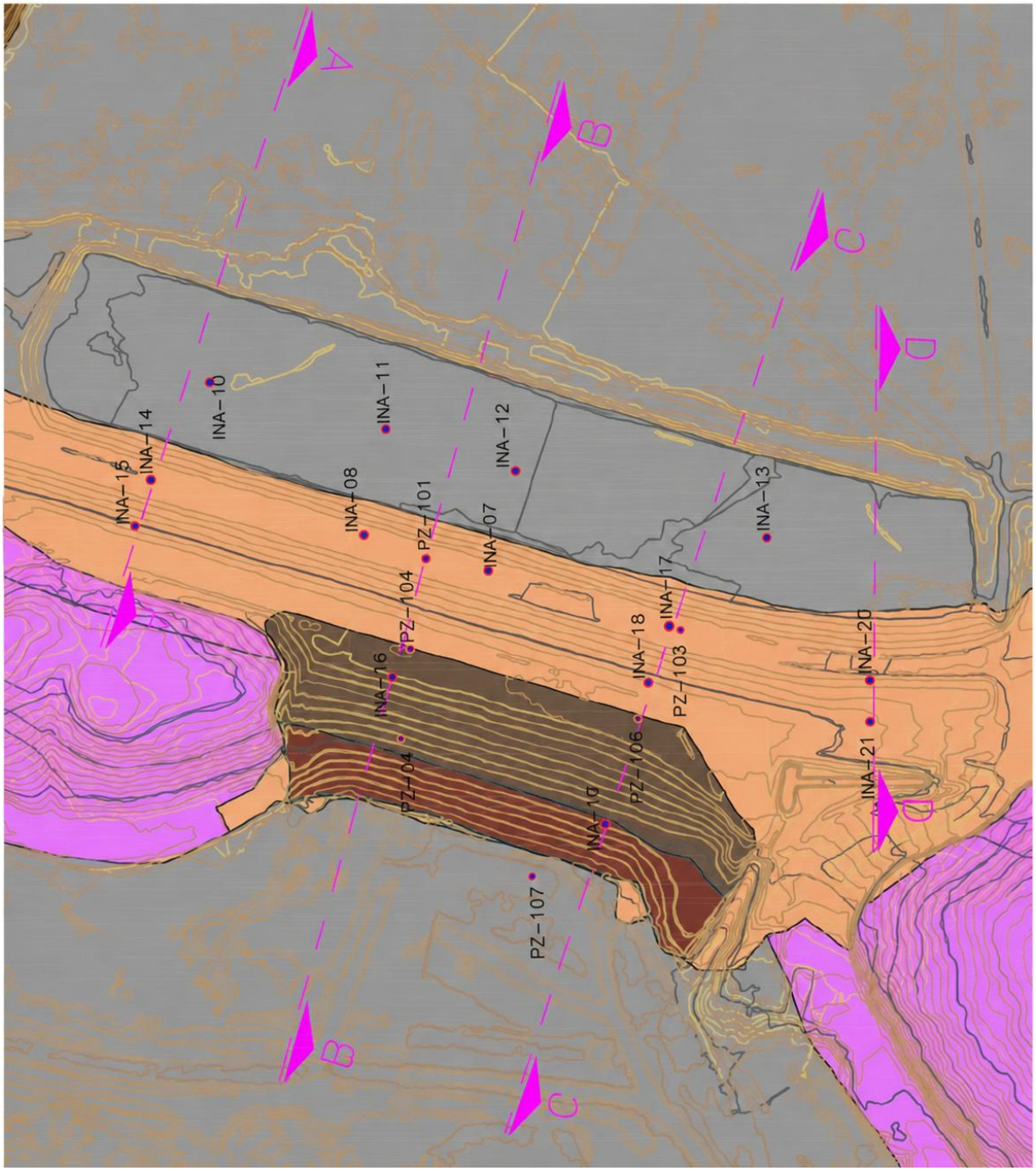


Figura 1: Localização dos instrumentos instalados na barragem



Figura 2: Materiais presentes na barragem

4.2 Caracterização Geológica

A área de estudo está inserida na porção centro-sul do Quadrilátero Ferrífero, uma das mais importantes províncias geológicas do Brasil, caracterizada por relevo montanhoso, forte dissecação do terreno e controle estrutural exercido por unidades arqueanas e paleoproterozoicas. A paisagem regional é marcada pela presença de serras, vales encaixados e encostas íngremes, resultantes da atuação conjunta dos processos tectônicos e erosivos ao longo da evolução geológica da região [9,10]. As formações superficiais são constituídas predominantemente por colúvios, solos residuais e saprolitos derivados de rochas metamórficas, especialmente filitos, conferindo elevada heterogeneidade geomorfológica e geotécnica ao ambiente.

Do ponto de vista pedológico, predominam Cambissolos e Argissolos desenvolvidos sobre rochas metamórficas, geralmente rasos e moderadamente drenados. Associadas ao relevo acidentado, essas características favorecem o escoamento superficial, os processos erosivos e o transporte de sedimentos durante eventos de chuva intensa. [11,12]

Sob o aspecto hidrográfico, a área integra um sistema de bacias de cabeceira pertencente à bacia do rio São Francisco, caracterizado por cursos d'água de pequeno porte, elevada declividade longitudinal e reduzidos tempos de concentração. O padrão de drenagem é fortemente condicionado pelo relevo acidentado e pela estrutura geológica regional, favorecendo a rápida transferência do escoamento superficial para os canais fluviais. Como consequência, observa-se elevada sensibilidade hidrológica durante eventos de precipitação intensa, com respostas rápidas das vazões e formação de hidrogramas com picos pronunciados, comportamento típico de bacias inseridas em ambientes montanhosos tropicais. [12]

4.3 Caracterização Hidroclimática

A climatologia regional enquadra-se no domínio tropical de altitude, apresentando marcada sazonalidade na distribuição das chuvas. O período chuvoso concentra-se predominantemente entre a primavera e o verão, enquanto os meses de inverno correspondem à estação seca. Esse regime climático é influenciado pela atuação dos sistemas atmosféricos típicos do Sudeste brasileiro, especialmente a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), responsável por parcela significativa dos eventos de precipitação mais expressivos da região [13].

A região está sujeita à ocorrência de eventos extremos de curta duração, frentes frias e sistemas convectivos de mesoescala, capazes de produzir chuvas intensas em poucas horas [12,13].

A unidade em que a barragem está inserida dispõe de uma série histórica de precipitação iniciada em 1981, composta por dados de pluviógrafos e pluviômetros distribuídos na área da mina. A análise estatística dessa série permitiu estimar uma precipitação média anual de 1.568,19 mm para a região, valor representativo do regime pluviométrico local em escala de longo prazo. (Figura 3).

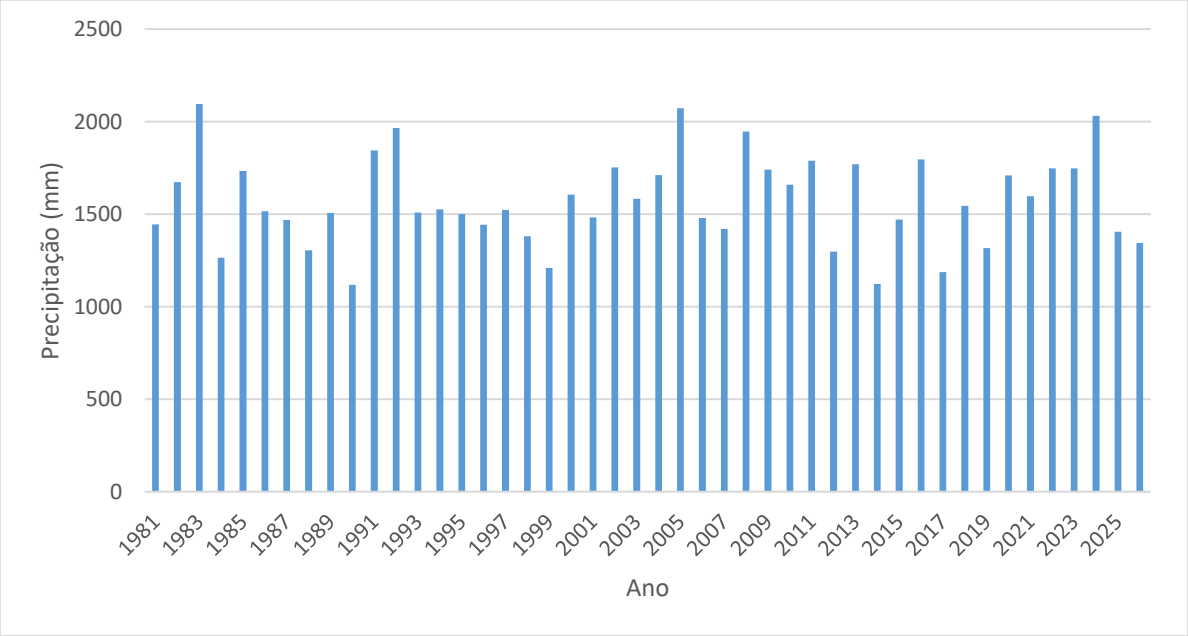


Figura 3: Precipitação acumulada anual

A avaliação da frequência pluviométrica realizada para a área aponta precipitações máximas diárias que podem superar 300 mm em cenários extremos, enquanto os valores de precipitação máxima provável (PMP) para 24 horas ultrapassam 350 mm, evidenciando o elevado potencial para geração de escoamento superficial e cheias rápidas em bacias de reduzida dimensão. Da mesma forma, análises de recorrência indicam que eventos associados a elevados períodos de retorno podem produzir precipitações significativamente superiores às médias históricas, justificando a adoção de critérios conservadores em avaliações hidrológicas e de segurança hidráulica.

De forma integrada, a área pode ser classificada como um ambiente hidrológico típico de bacias de cabeceira inseridas em relevo montanhoso tropical, com forte controle geológico sobre a rede de drenagem, elevada capacidade de geração de escoamento superficial, transporte ativo de sedimentos e significativa sazonalidade climática. Tais características condicionam uma dinâmica hidrológica marcada por respostas rápidas aos eventos de chuva, elevada energia dos canais fluviais e contínua evolução geomorfológica das vertentes e dos sistemas de drenagem, aspectos amplamente reconhecidos para o contexto do Quadrilátero Ferrífero e de outras regiões montanhosas do Sudeste brasileiro. [9,10,14]

4.3 Seções analisadas

Para o presente estudo, foram analisadas quatro seções transversais da barragem:

i. Seção A-A, composta por 3 instrumentos, todos indicadores de nível d'água;
ii. Seção B-B, composta por 8 instrumentos, sendo 5 indicadores de nível d'água e 3 piezômetros;
iii. Seção C-C, composta por 7 instrumentos, sendo 4 indicadores de nível d'água e 3 piezômetros (seção principal da barragem);
iv. Seção D-D, composta por 2 instrumentos, ambos indicadores de nível d'água.

O histórico de monitoramento abrange leituras realizadas ao longo de três ciclos hidrológicos, entre outubro de 2023 e março de 2026. Os dados de pluviometria foram disponibilizados pelo empreendedor, obtidos por meio de uma estação meteorológica instalada nas proximidades da estrutura.

Com base nos dados coletados, foram elaborados gráficos da instrumentação para cada seção da barragem. Os resultados foram avaliados em conjunto com as seções geológico-geotécnicas, o que permitiu avaliar a influência da linha freática em todas as seções, identificar os efeitos da pluviometria sobre a estrutura e contribuir para a compreensão do comportamento hidráulico da barragem.

4.4 Análise de percolação

A análise de percolação foi conduzida por meio do software Slide2 (Rocscience Inc., Toronto, Canadá), versão 9.041 (64 bits), considerando a seção crítica da estrutura (seção C–C). Para a representação dos materiais constituintes da estrutura, foram adotados os valores de condutividade hidráulica obtidos em ensaios geotécnicos e disponibilizados pelo empreendedor. Os parâmetros empregados na modelagem estão apresentados na

Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de condutividade hidráulica

Materiais	**Parâmetros de condutividade hidráulica**	
	k (m/s)	**kx/ky**
Dique de Partida	$1{,}33 \times 10^{-7}$	0,5

Aterro 1º Alteamento	$1{,}33 \times 10^{-7}$	0,5
Aterro 2º Alteamento	$1{,}33 \times 10^{-7}$	0,5
Aterro 3º Alteamento	$1{,}33 \times 10^{-7}$	0,5
Lastro (Material Laterítico)	$1{,}0 \times 10^{-6}$	1
Rejeito	$3{,}16 \times 10^{-7}$	1
Berma Existente (Saprolito)	$5{,}6 \times 10^{-11}$	1
Berma de Estabilização (El. 940,0 m)	$2{,}0 \times 10^{-6}$	1
Berma Rejeito Compactado (El. 945,0 m)	$5{,}6 \times 10^{-11}$	1
Berma Rejeito Compactado (El. 947,0 m)	$5{,}6 \times 10^{-11}$	1
Solo Residual de Filito	$8{,}12 \times 10^{-6}$	1
Saprolito de Filito	$8{,}12 \times 10^{-6}$	1
Dreno - Areia	$1{,}0 \times 10^{-7}$	1
Dreno – Brita	$1{,}0 \times 10^{-4}$	1

As condições de contorno foram definidas em termos da carga hidráulica a montante da seção. Como o reservatório não apresentava lâmina d'água suficiente para a simulação, adotou-se a cota da soleira do vertedouro, localizada na elevação 948,63 m. A jusante da estrutura, foi considerada a cota do terreno na elevação 933,76 m a fim de evitar erros na rede de fluxo.

Os valores de INAs e PZs inseridos na modelagem corresponderam aos máximos registrados no período de outubro de 2023 a março de 2026, garantindo representatividade das condições mais críticas observadas.

5. RESULTADOS

5.1 Seções transversais de análise

A seguir, são apresentadas as seções geológica-geotécnicas, contendo cada instrumento instalado na barragem. Além disso, é possível observar os gráficos correspondentes aos instrumentos, organizados por seção. Vale destacar que os PZs estão indicados em vermelho, enquanto os INAs são representados em azul nas respectivas seções.

5.1.1 Seção A-A

As Figura 4 e Figura 5 apresentam, respectivamente, a seção geológico-geotécnica e o gráfico dos instrumentos da seção A-A.

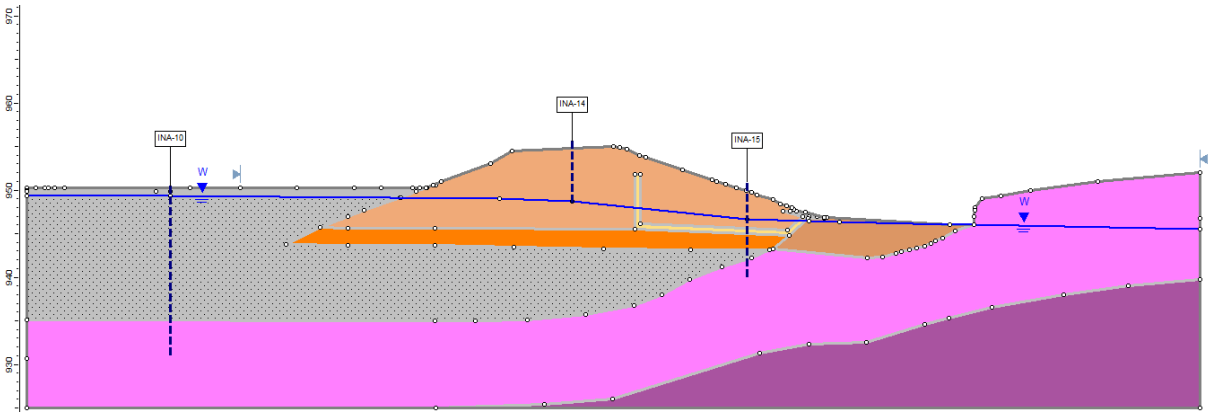


Figura 4: Seção geológica-geotécnica A-A

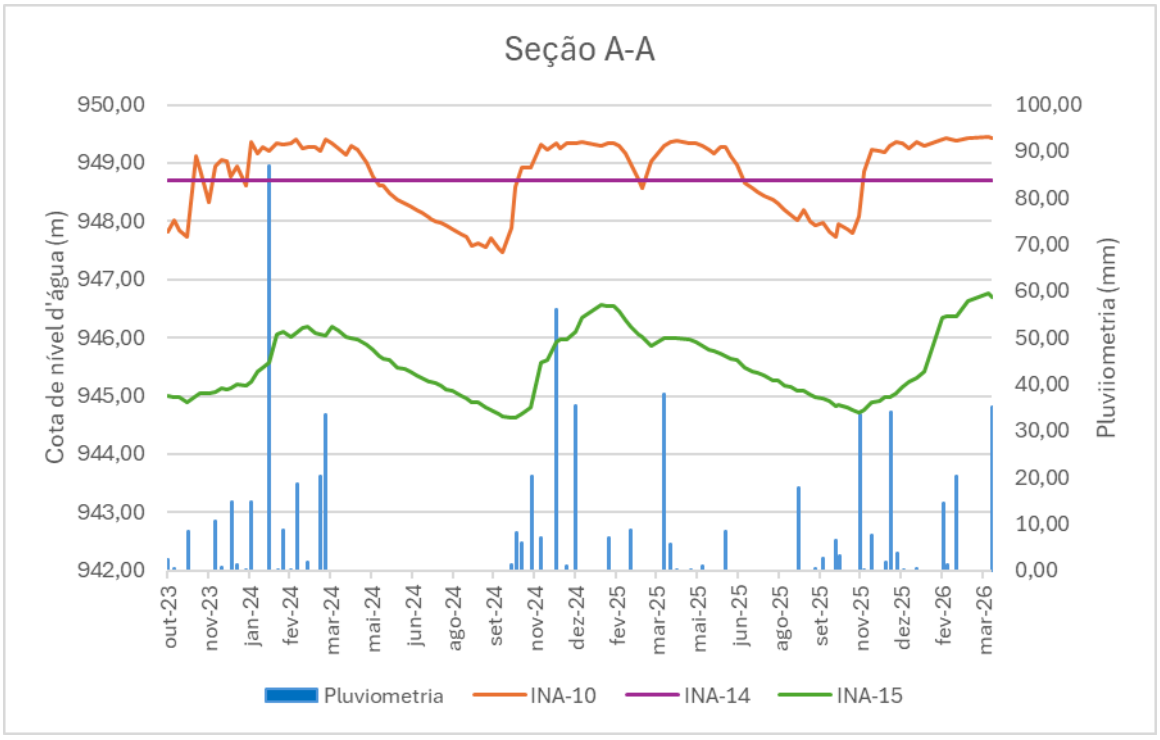


Figura 5: Gráfico dos instrumentos instalados na seção A-A

É possível observar que o instrumento INA-14 apresentou comportamento estável entre outubro de 2023 e março de 2026, com leituras registradas em condição seca, idênticas à sua cota de fundo (948,70 m). Essa estabilidade está relacionada ao seu local de instalação, no interior do maciço, o que justifica a constância observada no monitoramento do nível freático no aterro.

Já os instrumentos INA-10 e INA-15 apresentaram variações influenciadas pela pluviometria local. O INA-10, instalado na porção predominante de rejeito, registrou variações do nível d'água de até 1,97 m. Observa-se uma tendência de elevação após eventos pluviométricos, seguida de reduções durante períodos de estiagem, indicando uma resposta relativamente rápida à infiltração. Esse comportamento é compatível com materiais de maior condutividade hidráulica, que apresentam coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-4} a 10^{-6} m/s.

Por fim, o INA-15, apresentou variações do nível d'água na ordem de 2,14 m. Observa-se uma resposta direta do instrumento após eventos pluviométricos mais intensos, especialmente nos períodos de janeiro de 2024, novembro de 2024 e novembro de 2025. Esse comportamento evidencia a maior sensibilidade hidráulica desses materiais presentes na fundação e na ombreira da estrutura, em comparação aos materiais constituintes do maciço, reforçando a adequação do local de instalação para a verificação da eficiência dos filtros vertical e horizontal.

5.1.2 Seção B-B

As Figura 6 e Figura 7 apresentam, respectivamente, a seção geológico-geotécnica e o gráfico dos instrumentos da seção B-B.

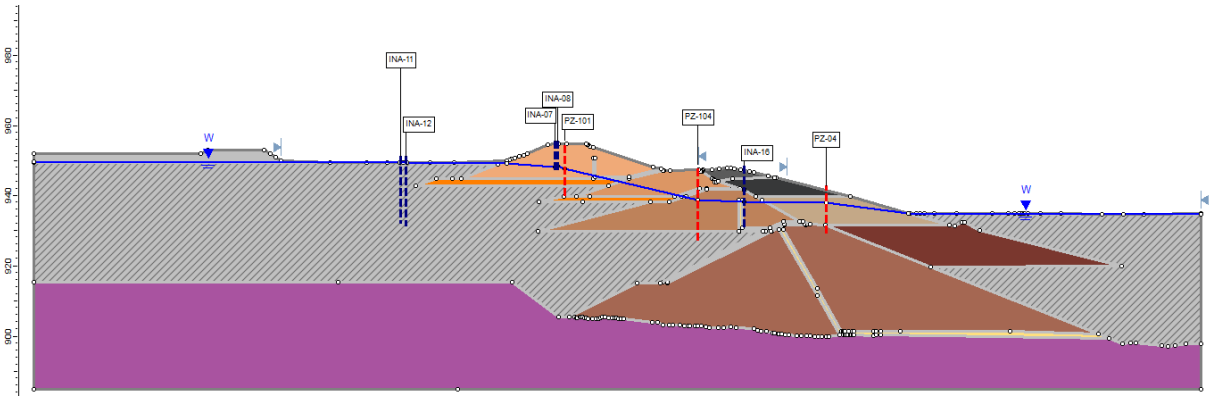


Figura 6: Seção geológica-geotécnica B-B

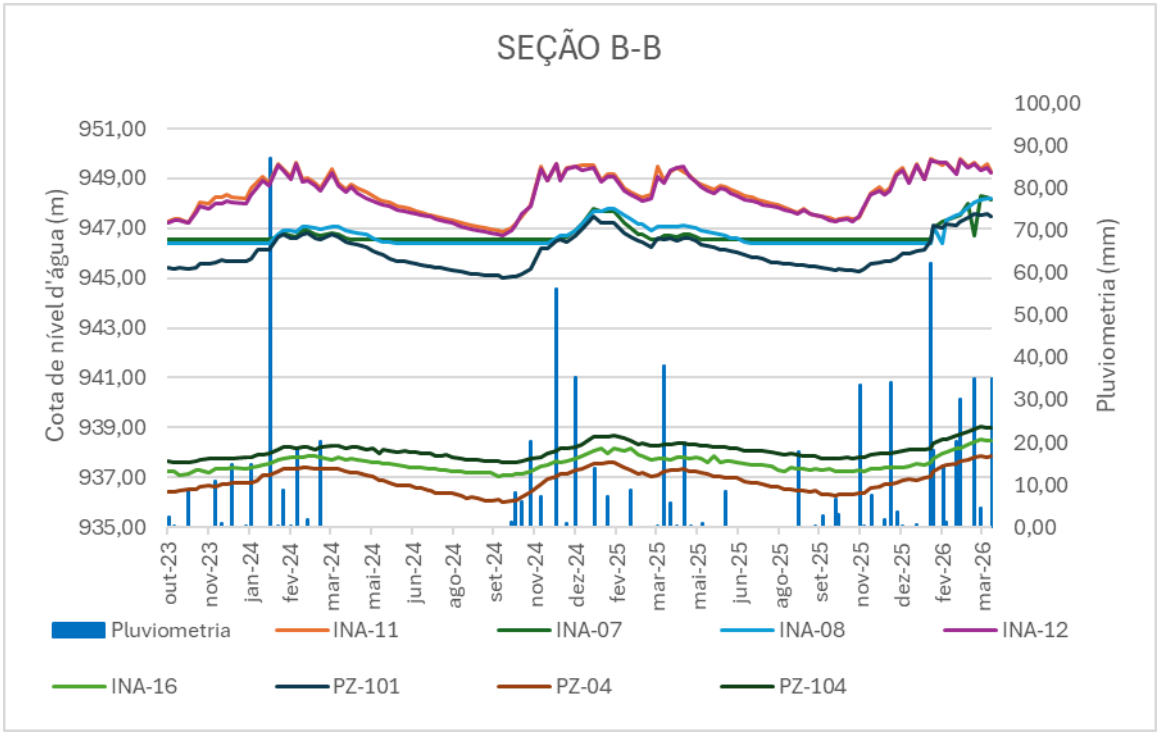


Figura 7: Gráfico dos instrumentos instalados na seção B-B

Assim como os instrumentos instalados no rejeito na seção A-A, os instrumentos INA-11 e INA-12, apresentam resposta rápida às precipitações. Esse comportamento está associado à sua posição em materiais confinados hidraulicamente pelo alteamento, onde ocorre maior retenção de água. Observa-se a ascensão do nível d'água após períodos de maior pluviometria, especialmente nos meses de dezembro de 2023, outubro de 2024 e novembro de 2025.

Os instrumentos INA-16, PZ-04 e PZ-104 apresentam comportamentos semelhantes, caracterizados por variações hidrodinâmicas de baixa amplitude, com valores entre as cotas 936,00 e 939,00 m. Diferentemente dos instrumentos localizados mais a montante da estrutura e no reservatório, que respondem de forma mais acentuada a eventos pluviométricos, esses instrumentos, estão instalados em locais de menor permeabilidade, onde a dissipação hidráulica ocorre de maneira mais lenta e controlada, evidenciando a eficiência do sistema de drenagem interna da barragem.

Os instrumentos INA-07 e INA-08, instalados próximos ao talude de montante, monitoram, o nível freático do aterro da estrutura. Ambos registram leituras secas durante os períodos de estiagem e respondem de forma direta aos eventos pluviométricos mais intensos. O PZ-101, também localizado próximo ao talude de montante, possui sua célula piezométrica instalada no contato entre o rejeito e o lastro, com a finalidade de avaliar a poropressão nesta região. Em conjunto, estes instrumentos apresentam maior sensibilidade às variações sazonais ao longo do período monitorado.

5.1.3 Seção C-C

As Figura 8 e Figura 9 apresentam, respectivamente, a seção geológico-geotécnica e o gráfico dos instrumentos da seção C-C.

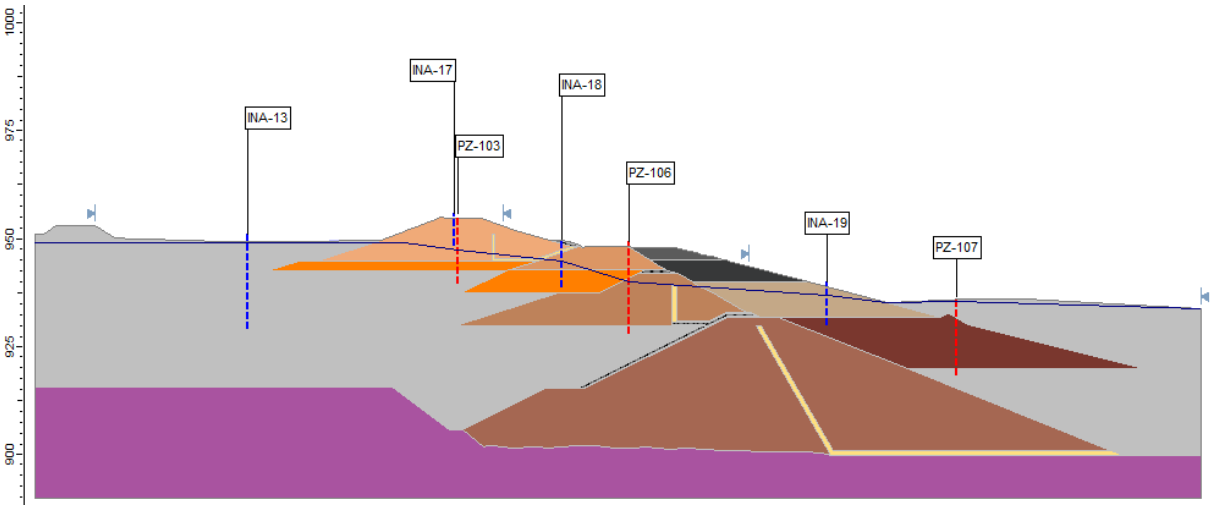


Figura 8: Seção geológica-geotécnica C-C

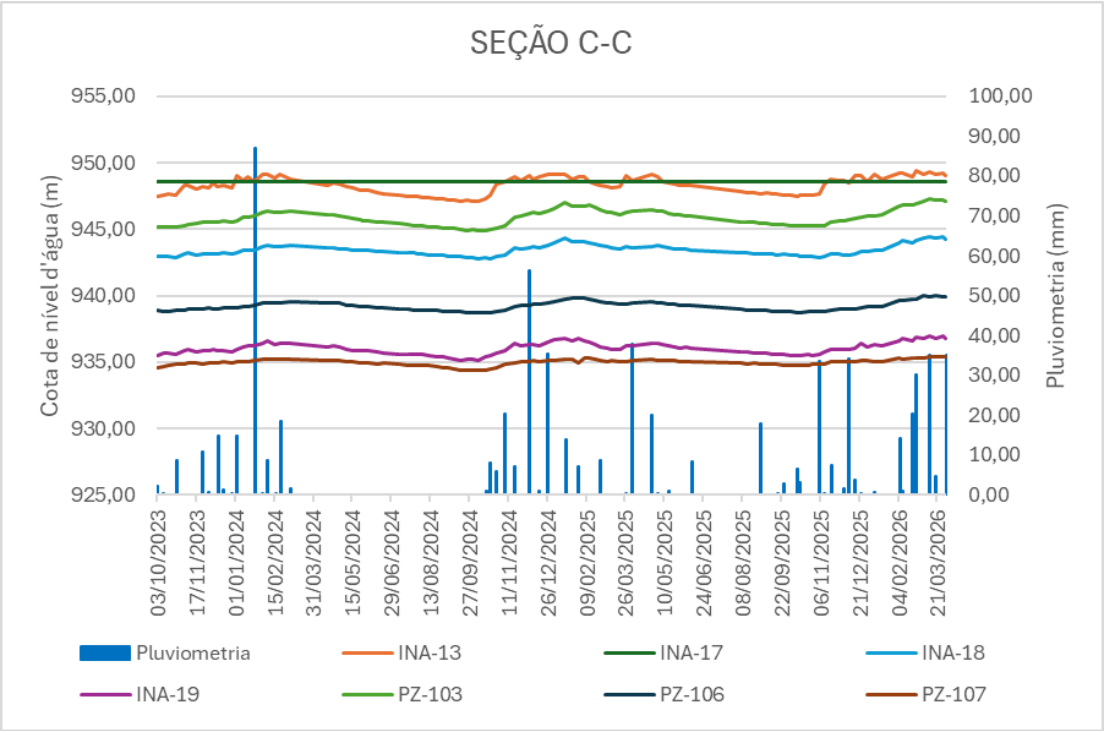


Figura 9: Gráfico dos instrumentos instalados na seção C-C

O instrumento INA-13 é responsável pelo monitoramento do nível freático no reservatório da barragem. Em função de sua localização, apresenta resposta imediata às variações pluviométricas. Durante o período analisado, as leituras indicaram uma oscilação de aproximadamente 2,29 m, evidenciando a influência direta das precipitações sobre o comportamento hidráulico do rejeito.

De forma semelhante aos instrumentos INA-07 e INA-08, instalados na seção B-B, e ao INA-14, localizado na seção A-A, o INA-17 encontra-se posicionado próximo ao talude de montante, monitorando o aterro da estrutura. No intervalo avaliado, o instrumento manteve-se seco, registrando nível estável na cota 948,62 m. Esse resultado demonstra que o fluxo freático não intercepta o último alteamento construído e confirma a baixa permeabilidade do aterro, característica que contribui positivamente para a segurança da obra em comparação a materiais mais permeáveis.

Em contraste, o piezômetro PZ-103 possui sua célula instalada no rejeito, próxima ao último lastro, monitorando a poropressão nessa região. Entre todos os instrumentos da seção, o PZ-103 apresentou a maior variação do nível d'água, oscilando entre as cotas 944,90 m e 947,27 m. Essa flutuação está associada à elevada permeabilidade do rejeito, que conforme citado nos itens anteriores, favorece maior mobilidade do fluxo de água e, consequentemente, maior variação piezométrica.

Os instrumentos INA-18 e PZ-106 não registraram variações significativas do nível d'água ao longo do período analisado. As pequenas oscilações observadas indicam condições estáveis de fluxo interno na barragem e ausência de poropressão excessiva nessa região.

Por fim, os instrumentos INA-19 e PZ-107 apresentaram as menores cotas da seção, com valores próximos a 935 m. Apesar das variações discretas ao longo do período avaliado, os dados sugerem estabilidade hidráulica na região de jusante, evidenciando a eficiência dos sistemas de drenagem interna e de controle da percolação da estrutura.

5.1.4 Seção D-D

As Figura 10 e Figura 11 apresentam, respectivamente, a seção geológico-geotécnica e o gráfico dos instrumentos da seção D-D.

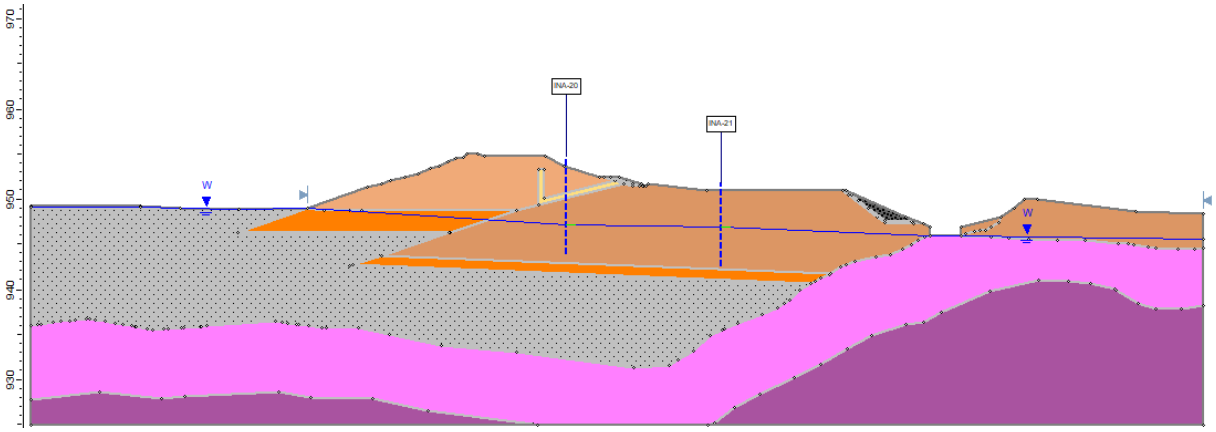


Figura 10: Seção geológica-geotécnica D-D

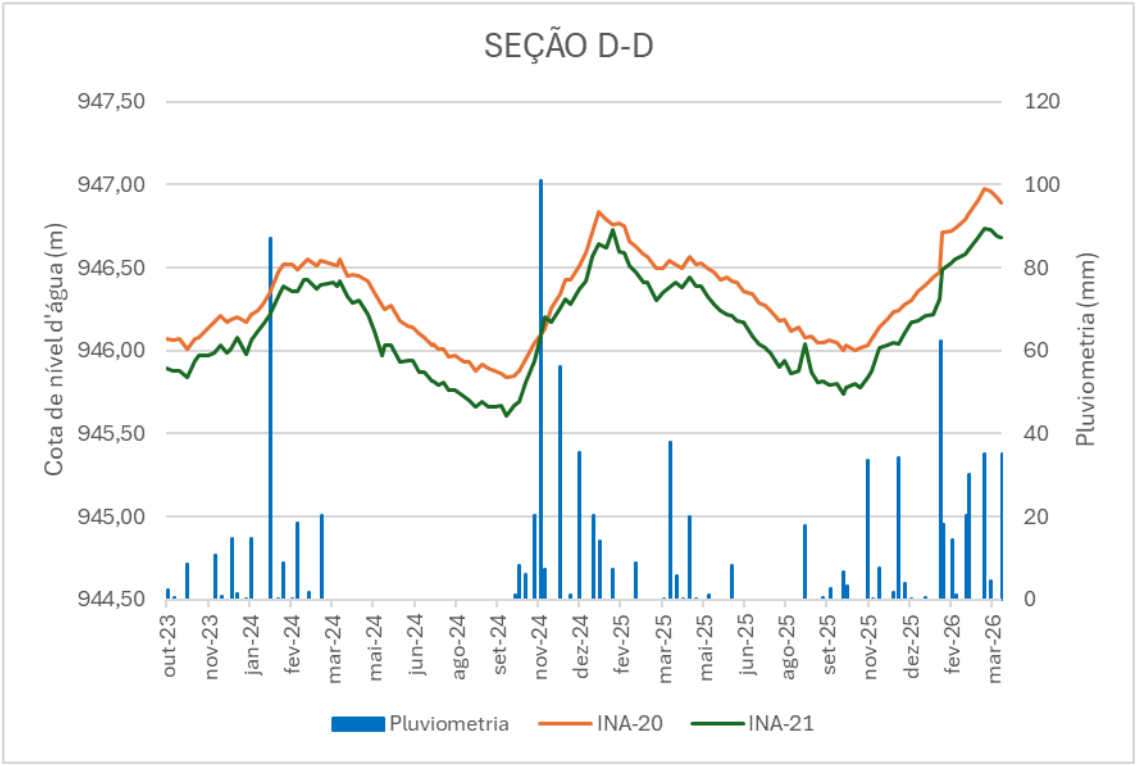


Figura 11: Gráfico dos instrumentos instalados na seção D-D

Os instrumentos da seção D-D apresentaram variações de nível d'água correlacionados com os eventos pluviométricos, seguindo o padrão observado nas demais seções da estrutura. Essa resposta sazonal é compatível com o comportamento hidráulico esperado para o material do aterro, cujo coeficiente de permeabilidade é da ordem de 10^{-6} a 10^{-7}, indicando resposta às recargas hídricas. Adicionalmente, observou-se que o comportamento destes instrumentos é influenciado não apenas pela infiltração direta do corpo do aterro, mas também pelo fluxo proveniente da ombreira esquerda da estrutura.

5.2 Resultados encontrados

A partir dos gráficos gerados, é possível perceber que o ciclo hidrológico da região apresenta uma sazonalidade bem definida, caracterizada pelo período chuvoso entre os meses de outubro e março e pelo período de estiagem entre abril e setembro. Essa variação se reflete diretamente nas leituras dos instrumentos, sobretudo nos piezômetros e indicadores de nível d'água, evidenciando a influência da precipitação sobre a linha freática e o comportamento hidráulico da barragem.

Assim, verifica-se que todos os instrumentos instalados na estrutura responderam à pluviometria conforme esperado. Aqueles posicionados em materiais de maior permeabilidade, como os rejeitos, apresentaram resposta imediata às variações de precipitação. Por outro lado, os instrumentos instalados no aterro da barragem, caracterizado por menor permeabilidade, registraram alterações apenas em eventos de pluviometria mais intensa, confirmando o comportamento diferenciado dos materiais constituintes da estrutura.

Além disso, a análise integrada dos dados permite avaliar o desempenho do sistema de drenagem interna da barragem. As leituras indicam que o sistema está operando de forma adequada, cumprindo sua função de controlar as pressões internas e assegurar a estabilidade hidráulica da estrutura. A ausência de anomalias nas respostas instrumentais confirma a eficiência dos drenos e reforça a confiabilidade do sistema, mesmo em períodos de elevada pluviometria. Esses resultados são fundamentais para a manutenção da segurança operacional e constituem uma base sólida para futuras análises de desempenho da barragem.

5.3 Análise de percolação

A Figura 12 apresenta o resultado da análise de percolação realizada na seção crítica da barragem.

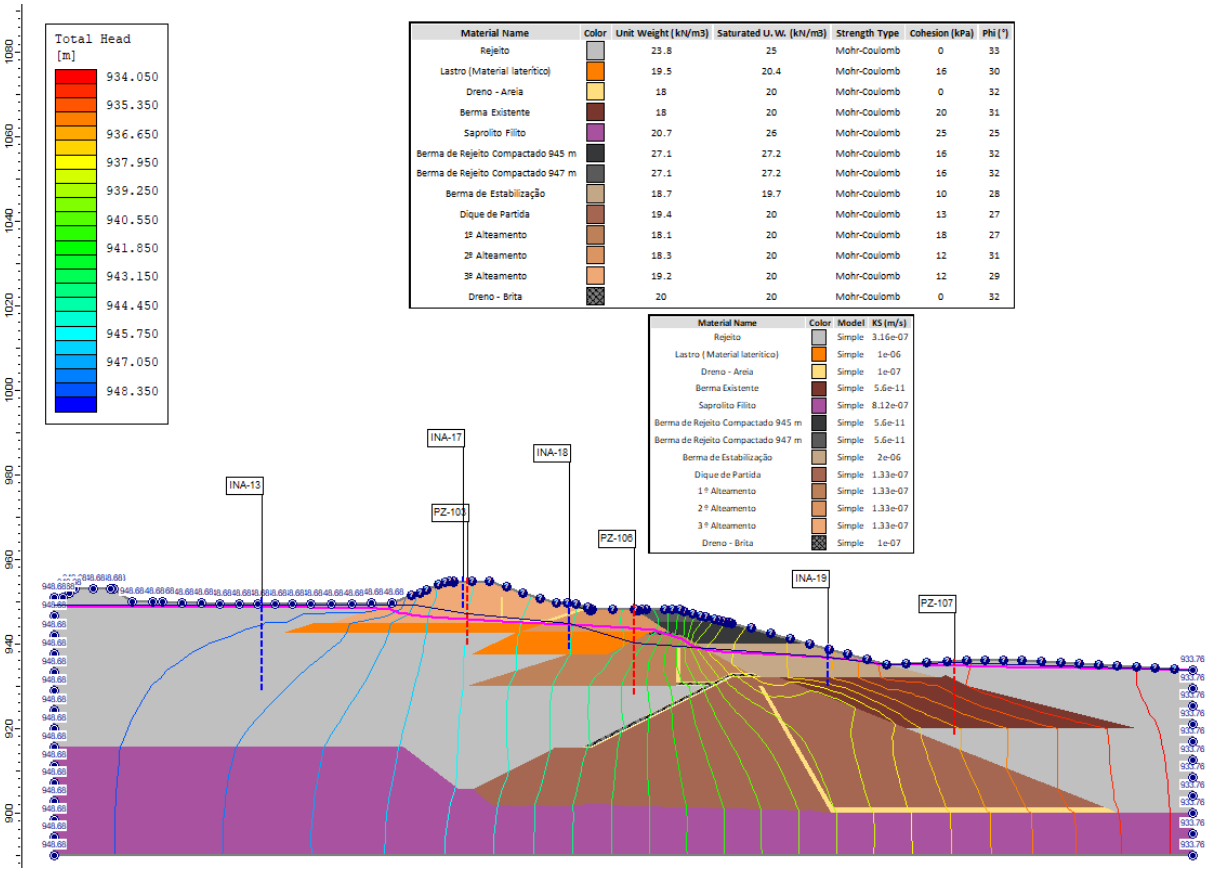


Figura 12: Resultado da análise de percolação

A análise realizada evidencia um comportamento hidráulico compatível com as condições de fluxo interno e com a estabilidade da estrutura. A linha freática apresenta trajetória contínua e controlada ao longo da seção, sem ocorrência de anomalias, como surgências, o que demonstra a eficiência dos sistemas de drenagem interna.

As linhas equipotenciais revelam uma diminuição gradual à medida que se afastam da cista da estrutura, confirmando a adequada calibração do modelo. Os gradientes hidráulicos obtidos na simulação apresentam redução ao longo da seção, corroborando a diminuição progressiva da seção neutra no interior do maciço e indicando condições de percolação compatíveis com o comportamento hidráulico esperado da estrutura.

6. CONCLUSÕES

A análise integrada dos dados de instrumentação geotécnica e da pluviometria permitiu avaliar o comportamento hidráulico da barragem e a influência das precipitações sobre a linha freática. Os resultados demonstram que os instrumentos responderam de forma coerente às variações sazonais, com respostas rápidas em materiais permeáveis, como os rejeitos, e comportamento mais estável nos aterros compactados.

As análises indicam que o sistema de drenagem interna da barragem apresenta desempenho satisfatório, mantendo o controle da percolação e das poropressões, sem indícios de anomalias hidráulicas. A modelagem de percolação confirmou a eficiência dos dispositivos e a estabilidade da estrutura nas condições avaliadas.

Conclui-se que a correlação entre os dados pluviométricos e a instrumentação geotécnica é fundamental para compreender o comportamento hidráulico de barragens e contribuir para a segurança operacional e a gestão preventiva dessas estruturas.

7. PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento Geotécnico; Barragens, Linha Freática, Pluviometria; Pressão Neutra.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BRASIL (2010) – “Lei n° 12.334 de 20 de setembro de 2010 - Política Nacional de Segurança de Barragens”, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF.

[2] BRASIL. (2020) – “Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 2010, para dispor sobre segurança de barragens.”, *Diário Oficial da União*, Brasília, DF.

[3] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). (2022) – “Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Estabelece diretrizes e procedimentos para a descaracterização de barragens de mineração construídas pelo método a montante ou consideradas alteradas’. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

[4] FONSECA, A.R. (2003) – “Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão”, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Ouro Preto.

[5] GOLFETO FILHO, A. R. (2023) – “Inspeção e avaliação da segurança de barragens de terra e encoramento”, Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

[6] CARDOSO, J. P.M.. (2025) – “CarCentros de monitoramento geotécnico em barragens de rejeito: revisão das abordagens manuais e automatizadas. CarMonografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas, Ouro Preto.

[7] PINHEIRO, M.C. (2011) – “Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamento Hidráulico em Obras de Mineração, Porto Alegra: ABRH. 308 p.

[8] FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. Groundwater. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979.

[9] YANG, F.; ZHANG, X.; YANG, J.; ZHANG, J.; DAI, Q.; ZHU, S. Enhancing groundwater predictions by incorporating response lag effects in machine learning models. Journal of Hydroinformatics, v. 27, n. 2, p. 338–356, 2025.

[10] CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

[11] ROSS, J. L. S. Ecogeografia do Brasil: subsídios para planejamento ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

[12] IBGE. Manual técnico de geomorfologia. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2009.

[13] TUCCI, Carlos E. M. (org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2013.

[14] NIMER, Edmon. Climatologia do Brasil. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989.

	**Iara MOREIRA** Engenheira de Minas formada pelo CEFET e pós-graduada pelo Instituto Minere em Geotecnia e Segurança de Barragens e Pilhas de Mineração, com experiência em monitoramento de estruturas, estabilidade de taludes, gestão e gerenciamento de riscos geotécnicos.
	**Laura SILVA** Engenheira Ambiental e Sanitarista (UFAL, 2018). Mestre em Engenharia Geotécnica (UNB, 2023). Especialista em Engenharia de Estruturas Hidráulicas (Unyleya, 2026). Atuação em segurança de barragens, com experiência em projetos de drenagem superficial de barragens e pilhas, dimensionamento de estruturas hidráulicas, estudos de ruptura hipotética e modelagem hidrológica.
	**Maria Luiza VIEIRA** Engenheira civil formada pela UNESP e pós-graduada pela PUC-Minas em Geotecnia, com atuação em segurança de barragens, análises de estabilidade, monitoramento geotécnico e gestão de riscos, com experiência em elaboração de relatórios para suporte à tomada de decisão.

	**Ewerton CRUZ** Engenheiro Ambiental (Newton Paiva, 2015), Mestre (2018) e Doutor (2022) em Geografia – Tratamento da Informação Espacial pela PUC Minas. Especialista em Engenharia Geotécnica (Única, 2023) e em Recursos Hídricos Aplicados à Mineração (Focus, 2026). Atua em Segurança de Barragens, com experiência em PAEBM, PSB, geoprocessamento, manutenção de barramentos e gestão de riscos.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

AVALIAÇÃO DOS DRENOS DE ALÍVIO DA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM POR GRAVIDADE

Nathalia Gabriela RIBEIRO GOULART
Engenheira Geotécnica - HIDROBR Consultoria

Lucas MARTINS MACHADO
Engenheiro Geotécnico - HIDROBR Consultoria

RESUMO

Este estudo tem o objetivo de apresentar a avaliação dos drenos de alívio de uma barragem de concreto, cuja ausência de vazões mensuráveis havia motivado sua classificação quanto ao Nível de Perigo Global (NPG) em condição de atenção. O trabalho visou verificar se a ausência de vazão indicava ineficiência do sistema de drenagem ou se era compatível com as condições hidráulicas esperadas para a estrutura analisada. Para isso, foi adotada uma metodologia integrada composta por avaliação documental, verificação do histórico de limpeza dos drenos, além da simulação numérica simplificada das condições de subpressão e percolação na interface concreto–fundação. Os resultados demonstraram que, para as condições avaliadas, a ausência de vazão nos drenos de alívio não caracterizava ausência de controle de subpressões na fundação, mostrando-se coerentes com o regime hidráulico estimado para a estrutura. Essa interpretação considerou as premissas de projeto, o tratamento executado na fundação e o desempenho esperado para o sistema. Conclui-se que leituras nulas em drenos de alívio não devem ser automaticamente associadas a ineficiência no controle de subpressões, devendo ser avaliadas em função do comportamento hidráulico previsto para a estrutura e das condições verificadas em campo, buscando outras formas de monitoramento desta grandeza.

ABSTRACT

This study aims to present an evaluation of the relief drains of a concrete dam, whose lack of measurable flow had led to its classification as being in a state of alert regarding the Global Hazard Level (GHL). The work sought to verify whether the absence of flow indicated inefficiency in the drainage system or whether it was

compatible with the expected hydraulic conditions for the analyzed structure. To this end, an integrated methodology was adopted, consisting of document review, verification of the drain cleaning history, and simplified numerical simulation of uplift and percolation conditions at the concrete-foundation interface. The results demonstrated that, under the evaluated conditions, the absence of flow in the relief drains did not characterize a lack of uplift control in the foundation, proving consistent with the hydraulic regime estimated for the structure. This interpretation considered the design assumptions, the treatment performed on the foundation, and the expected performance of the system. It is concluded that zero readings in relief drains should not be automatically associated with inefficiency in uplift pressure control, and should be evaluated based on the hydraulic behavior predicted for the structure and the conditions verified in the field, seeking other ways to monitor this quantity.

1. INTRODUÇÃO

Em barragens de concreto, as subpressões atuantes na interface concreto–fundação constituem um dos principais aspectos associados à estabilidade da estrutura [1]. Cortinas de injeção, drenos de alívio e galerias de drenagem são elementos usualmente empregados para reduzir a percolação pela fundação e limitar as subpressões atuantes na base do barramento. Estudos recentes têm avaliado a influência dos drenos de alívio na magnitude da força de subpressão e do gradiente hidráulico na fundação, destacando a importância desses dispositivos na segurança das barragens [2-3].

A avaliação do desempenho desses sistemas, entretanto, exige a interpretação conjunta das leituras de vazão, das condições da fundação e das premissas de projeto [4]. Embora a ocorrência de vazões mensuráveis possa indicar a atuação dos drenos, leituras nulas não devem ser automaticamente interpretadas como ineficiência dos dispositivos. Em fundações tratadas por injeção ou com baixa permeabilidade, a ausência de vazão pode ser compatível com a reduzida percolação pelo maciço.

Com base nessa problemática, este artigo apresenta a avaliação dos drenos de alívio de uma barragem de concreto convencional destinada à geração de energia, cuja ausência de vazões mensuráveis motivou questionamentos quanto à efetividade do sistema de drenagem e contribuiu para sua classificação em condição de atenção em auditorias anuais. A análise buscou verificar se o comportamento observado indicava ineficiência dos drenos ou se era compatível com o regime hidráulico esperado para uma fundação tratada. Para tanto, foram integradas informações documentais, resultados de limpeza dos drenos, verificação da carga mínima necessária para artesianismo e modelagem numérica simplificada das condições de fluxo e subpressão. Dessa forma, o estudo contribui para o aprimoramento da interpretação dos dados de monitoramento dos drenos de alívio, ao apresentar uma abordagem de avaliação baseada na integração de evidências técnicas.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA AVALIADA

A estrutura analisada corresponde a uma barragem de concreto convencional destinada à geração de energia, localizada na região central de Minas Gerais, cujo primeiro enchimento ocorreu em 2003. A barragem possui aproximadamente 18 m de altura e 60 m de comprimento, com vertedouro de soleira livre.

O tratamento da fundação da barragem contemplou a execução de cortinas profundas de injeção de calda de cimento e a implantação de drenos de fundação. As cortinas de injeção foram executadas com o objetivo de reduzir a permeabilidade e homogeneizar o maciço de fundação, enquanto os drenos foram concebidos para promover o alívio das subpressões atuantes na base da estrutura. A estrutura possui galeria de drenagem com acesso localizado no pé da barragem, na porção central, mais próxima à margem direita, a qual abriga as saídas dos drenos de fundação. O sistema de drenagem é composto por 17 drenos, executados com revestimento em tubo de aço, diâmetro nominal de 100 mm, e espaçamento aproximado de 3 m entre dispositivos. A disposição em frontal dos drenos de fundação é apresentada na Figura 1.

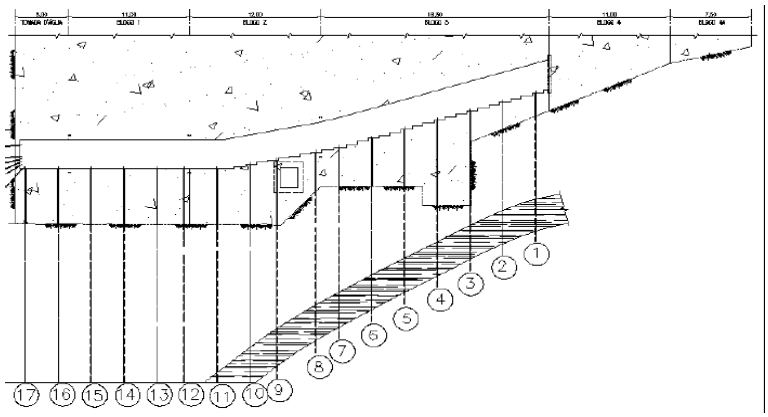


Figura 1 - Galeria drenante em frontal.

O monitoramento dos drenos de fundação é realizado por meio de medidores de vazão instalados nas saídas dos dispositivos, no interior da galeria de drenagem. No entanto, os registros históricos indicaram leituras nulas de vazão ao longo do período avaliado. Essa condição motivou questionamentos quanto à eficiência do sistema de drenagem e ao controle das subpressões na fundação, resultando na classificação do nível de segurança da barragem como Atenção entre 2018 e 2022.

Esse contexto motivou a reavaliação técnica apresentada neste estudo, voltada à verificação da funcionalidade do sistema de drenagem e à interpretação da ausência de vazão considerando as características específicas da barragem.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada foi estruturada em quatro etapas: avaliação documental, limpeza e desobstrução dos drenos, avaliação da condição de artesianismo da galeria de drenagem e simulação numérica das condições de fluxo e subpressão da barragem. Tais etapas buscaram dar embasamento técnico para definir o comportamento da grandeza e indicar melhor forma de monitoramento da estrutura.

3.1 Avaliação documental

A avaliação documental constituiu a primeira etapa da metodologia e teve como objetivo consolidar as informações disponíveis sobre a estrutura analisada. Foram examinados documentos de projeto, relatórios de auditoria, registros de inspeção, dados históricos de monitoramento dos drenos e informações relativas ao tratamento da fundação.

Essa etapa permitiu identificar os fundamentos técnicos que motivaram a classificação da estrutura em condição de atenção, compreender a concepção original do tratamento de fundação e do sistema de drenagem, e estabelecer hipóteses para a ausência de vazões observada nos drenos de alívio.

3.2 Verificação da obstrução dos drenos

A partir da avaliação documental, foi indicada a limpeza dos drenos de alívio como medida de verificação da condição operacional dos dispositivos. A intervenção teve como finalidade remover eventuais sedimentos ou materiais depositados no interior dos drenos, os quais poderiam comprometer sua capacidade de condução hidráulica.

Após a execução da limpeza, os registros de vazão foram reavaliados, buscando-se verificar se a remoção de eventuais obstruções resultou em alterações no comportamento hidráulico dos drenos, especialmente quanto ao surgimento ou à variação de vazões mensuráveis.

3.3 Avaliação da condição de artesianismo da galeria de drenagem

A verificação do potencial de artesianismo nos drenos foi realizada com base na equação de Bernoulli, considerando a carga hidráulica disponível no ponto do dreno e a carga mínima necessária para que a água alcance a galeria de drenagem:

$$H = z + \frac{p}{\gamma w} + \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

em que H é a carga hidráulica total, z é a carga altimétrica, p/γ_w é a carga de pressão e $v^2/2g$ é a carga cinética, correspondente à parcela de energia associada à velocidade do escoamento. Para o caso avaliado, a parcela cinética foi desprezada, uma vez que o fluxo pela fundação ocorre com velocidades reduzidas.

A partir dessa simplificação, a verificação passou a considerar a relação entre a carga de pressão disponível no ponto do dreno e a diferença altimétrica necessária para que a água alcance a galeria de drenagem. Essa diferença de cotas foi adotada como a carga hidráulica mínima para ocorrência de artesianismo, pois representa a altura que a água sob pressão na fundação precisaria vencer para atingir a saída do dreno no interior da galeria.

3.4 Análise da carga hidráulica dos drenos por modelagem numérica

A simulação numérica foi desenvolvida com apoio do *software* Plaxis 3D, da Bentley, a partir de uma seção representativa da barragem que contempla a galeria de drenagem, ilustrado na Figura 2. O modelo foi utilizado para avaliar a carga hidráulica

atuante nos drenos de fundação e verificar o potencial de ocorrência de artesianismo na galeria, associado à possível geração de vazões mensuráveis nos drenos.

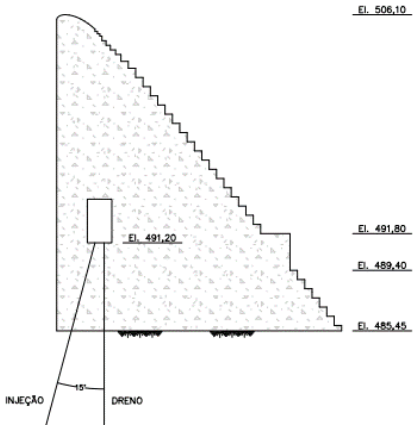


Figura 2 – Galeria drenante em seção

A modelagem numérica considerou a representação da estrutura, da fundação e dos dispositivos de controle hidráulico conforme as informações disponíveis de projeto. O tratamento de fundação por injeção de cimento foi representado por um tratamento de menor permeabilidade a montante, com inclinação de 15°, simulando o efeito das injeções na redução da percolação pela fundação. Os drenos foram representados como elementos verticais, conforme a configuração prevista em projeto.

Para a verificação do comportamento hidráulico, foram simulados três cenários. O primeiro considerou a presença do tratamento de injeção e os drenos inoperantes, permitindo avaliar a distribuição de cargas hidráulicas na fundação sem a atuação efetiva do sistema de drenagem. O segundo cenário considerou a presença do tratamento de injeção e os drenos operantes, representando a condição esperada de funcionamento da estrutura tratada. O terceiro cenário considerou a ausência do tratamento de injeção e os drenos operantes, permitindo avaliar a influência do tratamento de fundação sobre as cargas hidráulicas atuantes e sobre o potencial de geração de vazões nos drenos.

A partir dos resultados obtidos em cada cenário, as cargas hidráulicas estimadas nos pontos dos drenos foram comparadas com a carga mínima necessária para ocorrência de artesianismo na galeria de drenagem. Essa comparação permitiu verificar se as condições hidráulicas simuladas seriam suficientes para promover a ascensão da água até a saída dos drenos e, portanto, justificar a ocorrência de vazões mensuráveis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos na avaliação dos drenos de alívio da barragem. A análise integra as informações documentais, os dados de campo e os resultados da modelagem numérica, buscando subsidiar a interpretação do comportamento hidráulico observado na estrutura.

4.1 Avaliação documental

A análise dos documentos disponíveis permitiu compreender o histórico de avaliação da barragem, as premissas de projeto associadas ao sistema de drenagem e os questionamentos técnicos registrados em auditorias anteriores. A partir dessa análise, verificou-se que a interpretação do comportamento dos drenos não deveria se restringir à constatação das leituras nulas de vazão, mas considerar também as características da fundação tratada e o regime de subpressões esperado para a estrutura.

Embora a inexistência de escoamento pudesse ser inicialmente associada à obstrução ou à perda de funcionalidade dos drenos, a documentação analisada indicou que a baixa ou nula vazão também poderia estar relacionada à reduzida percolação pela fundação tratada. Nesse sentido, a ausência de vazões poderia decorrer de dois mecanismos distintos: ineficiência dos drenos, por obstrução ou perda de capacidade de condução hidráulica; ou ausência de fluxo significativo a ser drenado, em função da baixa permeabilidade da fundação e da reduzida carga hidráulica transmitida à região dos drenos.

Assim, a avaliação documental orientou as etapas seguintes do estudo, deslocando a análise de uma interpretação baseada apenas na existência de vazão para uma avaliação da coerência entre o comportamento monitorado, as condições da fundação e o desempenho hidráulico esperado para a barragem.

4.2 Verificação da obstrução dos drenos

A limpeza dos drenos teve como finalidade remover eventuais sedimentos, incrustações ou materiais acumulados no interior dos dispositivos, os quais poderiam restringir sua capacidade de condução hidráulica. Essa etapa permitiu verificar a condição física dos drenos e a possível existência de obstruções ao longo dos canais ascendentes.

Em seguida, os registros de vazão foram reavaliados, buscando-se identificar possíveis alterações no comportamento hidráulico dos drenos após a intervenção. Observou-se que não houve alteração nas vazões monitoradas, permanecendo a condição de ausência de vazões. Esse resultado indica que a limpeza dos dispositivos não resultou em mudança relevante no regime de vazões observado.

4.3 Avaliação da condição de artesianismo da galeria de drenagem

A carga hidráulica mínima necessária para ocorrência de artesianismo na galeria de drenagem foi definida pela diferença altimétrica entre a cota da galeria e a cota da base da barragem. Considerando a galeria na El. 491,20 m e a base da barragem na El. 485,45 m, obteve-se uma diferença de 5,75 m, equivalente a 5,75 mca.

Assim, para que houvesse artesianismo na galeria e possibilidade de registro de vazões mensuráveis nos dispositivos de medição, a carga hidráulica atuante nos drenos deveria ser igual ou superior a 5,75 mca. Valores inferiores a esse limite

indicam que a água sob pressão na fundação não teria carga suficiente para alcançar a saída dos drenos no interior da galeria.

4.4 Análise da carga hidráulica dos drenos por modelagem numérica

Inicialmente, foram comparados os Cenários 1 e 2, ambos considerando a presença do tratamento por injeção na fundação. O Cenário 1 representa a condição de drenagem inoperante, enquanto o Cenário 2 considera a drenagem operante. Essa comparação teve como objetivo avaliar a influência do sistema de drenagem na distribuição das subpressões ao longo da fundação da barragem. Os resultados obtidos para esses dois cenários são apresentados na Figura 3.

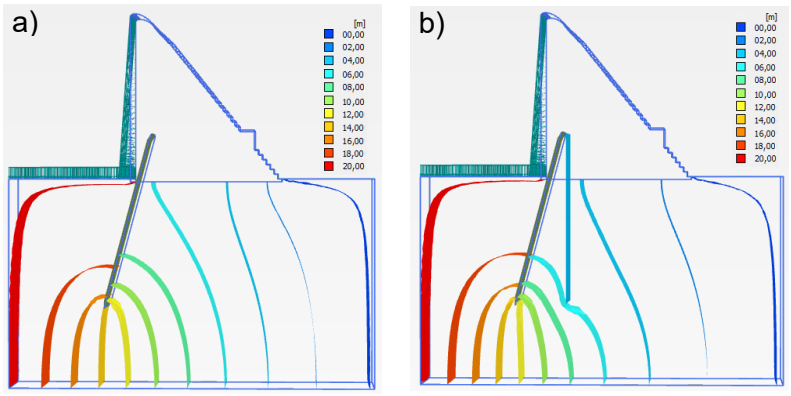


Figura 3 - Distribuição das subpressões na fundação para comparação entre os cenários com tratamento de injeção: (a) cenário 1 - drenagem inoperante; (b) cenário 2 - drenos operantes.

Os resultados indicaram que a atuação dos drenos operantes no Cenário 2 promoveu redução da ordem de 30% da subpressão em relação ao Cenário 1, evidenciando a contribuição do sistema de drenagem para a redução das subpressões atuantes na fundação, em concordância com a literatura [2].

Na sequência, a comparação entre os Cenários 2 e 3 teve como foco avaliar o potencial de ocorrência de vazões mensuráveis nos drenos, considerando os dispositivos em operação em ambos os casos. O Cenário 2 representou a condição com tratamento de injeção, conforme previsto em projeto, enquanto o Cenário 3 simulou a ausência desse tratamento. A Figura 4 apresenta a distribuição das subpressões na fundação para as duas condições simuladas.

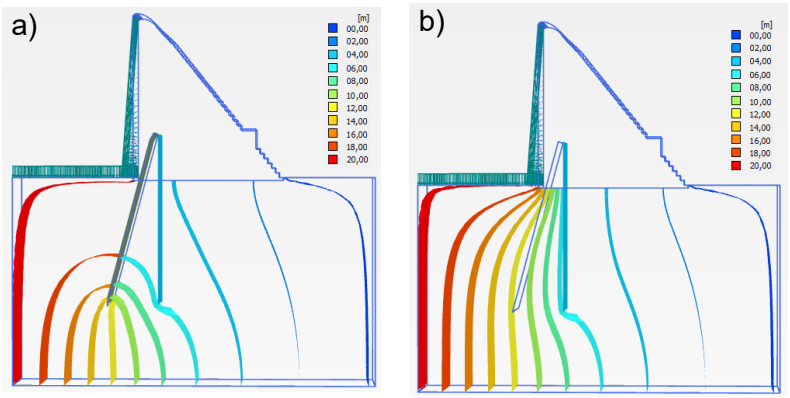


Figura 4 - Distribuição das subpressões na fundação para comparação entre os cenários com drenagem: (a) cenário 2 - tratamento de injeção; (b) cenário 3 - sem tratamento de injeção.

A Tabela 1 sintetiza as cargas hidráulicas obtidas nos pontos dos drenos, expressas em metros de coluna d'água, e sua comparação com a carga mínima necessária para ocorrência de artesianismo na galeria de drenagem.

Tabela 1 – Cenários com a conclusão sobre o artesianismo na galeria.

Cenário	Subpressão no dreno	Carga hidráulica mínima para artesianismo	Artesianismo na galeria
Com tratamento de injeção	5,09 mca	5,75 mca	Não
Sem tratamento de injeção	6,12 mca		Sim

A documentação analisada indica que a fundação da barragem foi tratada por injeção de cimento, tornando o cenário com tratamento de injeção o mais representativo da condição da estrutura. Nesse cenário, a carga hidráulica nos drenos permaneceu inferior à carga mínima para artesianismo, indicando que não seria esperado o registro de vazões mensuráveis.

No cenário sem tratamento de injeção, a carga hidráulica superou o limite para artesianismo, indicando que, na ausência do tratamento, haveria energia hidráulica suficiente para que a água alcançasse a galeria e gerasse vazões mensuráveis nos drenos. Essa comparação reforça a influência do tratamento de fundação na limitação da percolação e na redução da carga hidráulica atuante nos dispositivos de drenagem.

Assim, pela ordem de grandeza dos valores obtidos, a ausência de vazão mostra-se compatível com a configuração construtiva da barragem e com a redução da percolação associada ao tratamento da fundação.

5. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o comportamento dos drenos de alívio de uma barragem de concreto que apresentava leituras nulas de vazão, condição associada à sua classificação em estado de atenção. A análise teve como objetivo verificar se tais

leituras indicavam ineficiência do sistema de drenagem ou se eram compatíveis com o comportamento hidráulico esperado para a estrutura e sua fundação.

A metodologia foi composta por análise documental, para compreender as premissas de projeto e os fatores associados à classificação da barragem em condição de atenção; limpeza dos drenos de alívio, para avaliar a possível ocorrência de obstruções físicas; estimativa da carga hidráulica mínima necessária para ocorrência de artesianismo na galeria; e modelagem numérica, para estimar o regime de percolação na fundação da barragem.

Após a limpeza dos drenos de alívio, não foram observados aumentos nas vazões monitoradas, permanecendo a condição de leituras nulas. Esse comportamento indicou que a ausência de vazão não estava necessariamente associada à obstrução física dos dispositivos. A modelagem numérica, por sua vez, indicou que, considerando a presença do tratamento de fundação por injeções de cimento, as cargas hidráulicas estimadas nos drenos permaneceram inferiores à carga mínima necessária para ocorrência de artesianismo na galeria de drenagem. Dessa forma, os resultados sugerem que, nas condições analisadas, não seriam esperadas vazões mensuráveis nos drenos.

Embora a modelagem seja simplificada e seus resultados devam ser interpretados em termos de tendência e ordem de grandeza, a análise indicou que, nas condições consideradas, a ausência de vazão nos drenos não representa necessariamente ineficiência do sistema de drenagem. Esse resultado reforça a importância de interpretar os dados de monitoramento em conjunto com as condições de projeto e o tratamento executado na fundação, evitando a associação automática de leituras nulas a anomalias ou à necessidade de intervenções corretivas.

6. PALAVRAS-CHAVE

Drenos de alívio; Barragem de concreto; Subpressão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PEREIRA, R.; BATISTA, A. L.; NEVES, L. C.; CASACA, J. (2021) – “À priori uplift pressure model for concrete dam foundations based on piezometric monitoring data”, Structure and Infrastructure Engineering, v. 17, n. 11, p. 1523–1534.

[2] AGHDAM, A.; SALMASI, F.; ABRAHAM, J.; ARVANAGHI, H. (2021) – “Effect of Drain Pipes on Uplift Force and Exit Hydraulic Gradient and the Design of Gravity Dams Using the Finite Element Method”, Geotechnical and Geological Engineering, v. 39, p. 3383–3399.

[3] MA, C.; ZHAO, T.; LI, G.; ZHANG, A.; CHENG, L. (2022) – “Intelligent Anomaly Identification of Uplift Pressure Monitoring Data and Structural Diagnosis of Concrete Dam”, Applied Sciences, v. 12, n. 2, 612.

[4] CHENG, L.; HAN, J.; MA, C.; YANG, J. (2024) – “Safety Monitoring Method for the Uplift Pressure of Concrete Dams Based on Optimized Spatiotemporal Clustering and the Bayesian Panel Vector Autoregressive Model”, Water, v. 16, n. 8, 1190.



Nathalia Gabriela RIBEIRO GOULART

Possui 5 anos de experiência em projetos de estruturas geotécnicas, como barragens e pilhas, com ênfase em modelagem numérica. Engenheira Civil pela UFMG, Especialista em Engenharia Geotécnica pela PUC-MG e mestranda em Engenharia Civil – Geotecnia no CEFET/MG. Atua na HIDROBR desde 2021 e como Analista de Geotecnia desde 2023.



Lucas MARTINS MACHADO

Possui mais de 10 anos de experiência em projetos de estruturas geotécnicas, como barragens, pilhas e cavas, auditorias técnicas e gestão de barragens. Engenheiro Civil pela UFMG, Especialista em Engenharia de Barragens pela PUC-MG e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Atua na HIDROBR desde 2018 e como Gerente de Geotecnia desde 2023.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

DADOS PIEZOMÉTRICOS APLICADOS AO DIAGNÓSTICO DE SUBPRESSÕES E À DECISÃO DE DRENAGEM PROFUNDA EM BARRAGEM DE TERRA DA UHE JIRAU

Stella LANA DE SOUZA
Engenheira Civil e Geotécnica - Jirau Energia

Jakelline JARD DA SILVA
Coordenadora de Manutenção Civil e Segurança de Barragens - Jirau Energia

RESUMO

Barragens de terra implantadas sobre depósitos aluvionares heterogêneos podem desenvolver subpressões elevadas na fundação, comprometendo a estabilidade. Nesse contexto, a instrumentação é essencial no diagnóstico e suporte à tomada de decisão. Este trabalho apresenta o estudo de caso de uma Barragem de Terra na UHE Jirau, fundada sobre terraços fluviais com alternância de camadas arenosas e argilosas com elevada permeabilidade. Após o enchimento inicial do reservatório, leituras piezométricas indicaram níveis d'água elevados na fundação, com ocorrência localizada de artesianismo e gradientes de saída superiores aos valores de controle. A interpretação dos dados permitiu definir linhas piezométricas representativas para análises de estabilidade. Retroanálises indicaram fator de segurança mínimo para o nível máximo normal do reservatório, inferior ao critério de projeto (FS ≥ 1,50), evidenciando condição potencial a erosão interna. Com base no diagnóstico integrado entre instrumentação e modelagem numérica, foi dimensionado sistema de drenagem profunda composto por poços de alívio ao longo do pé de jusante. Simulações indicaram rebaixamento da linha freática de fundação e aumento do fator de segurança nas seções críticas. Os resultados demonstram que a abordagem observacional, o monitoramento piezométrico contínuo e retroanálises, são eficazes para identificação precoce de condições adversas, proposição de intervenções e verificação de desempenho, reforçando a instrumentação como linha de defesa essencial à segurança de barragens.

ABSTRACT

Earth dams founded on heterogeneous alluvial deposits may develop high uplift pressures in the foundation, compromising stability. In this context, instrumentation is essential for diagnosis and decision-making support. This study presents the case of an Earth Dam at the Jirau Hydroelectric Power Plant (HPP), founded on fluvial terraces characterized by alternating sandy and clayey layers with high permeability. After the initial reservoir impoundment, piezometric readings indicated elevated

groundwater levels in the foundation, with localized artesian conditions and exit gradients exceeding control values. Data interpretation allowed the definition of representative piezometric lines for stability analyses. Back-analyses indicated a minimum safety factor for the maximum normal reservoir level below the design criterion (FS ≥ 1.50), highlighting a potential internal erosion condition. Based on the integrated diagnosis combining instrumentation data and numerical modeling, a deep drainage system composed of relief wells along the downstream toe was designed. Simulations indicated a reduction in the foundation phreatic line and an increase in the safety factor in the critical sections. The results demonstrate that the observational approach, continuous piezometric monitoring, and back-analyses are effective for the early identification of adverse conditions, proposal of interventions, and performance verification, reinforcing instrumentation as an essential line of defense for dam safety.

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens de terra está diretamente associada à adequada compreensão dos mecanismos de fluxo, deformabilidade e resistência dos materiais que compõem o maciço e sua fundação. Em barragens apoiadas sobre depósitos naturais heterogêneos, especialmente de origem aluvionar, a variabilidade espacial dos materiais pode produzir trajetórias preferenciais de percolação, elevação de poropressões e redução das tensões efetivas, afetando a estabilidade global e aumentando a suscetibilidade a processos de erosão interna. Segundo Cruz [1], a avaliação do desempenho de barragens deve considerar não apenas os parâmetros de projeto, mas também a resposta real da estrutura durante sua vida operacional.

A percolação pela fundação constitui um dos aspectos mais relevantes no comportamento de barragens de terra. Fell [2] destaca que a erosão interna e o piping constituem a principal causa de falhas e incidentes em barragens de terra e suas fundações. Nessa mesma linha, Foster et al. [3] apontam que a identificação precoce de condições hidráulicas desfavoráveis é fundamental para a prevenção de falhas associadas a piping, especialmente em fundações estratificadas ou compostas por materiais erodíveis.

Nesse contexto, a instrumentação geotécnica assume papel essencial na gestão da segurança de barragens, pois permite comparar o comportamento previsto em projeto com o comportamento observado em campo. Silveira [4] ressalta que a instrumentação não deve ser compreendida apenas como um conjunto de dispositivos de medição, mas como parte de um sistema de auscultação capaz de subsidiar diagnósticos, reavaliações de projeto e decisões de intervenção. A abordagem observacional, conforme discutida originalmente por Peck [5], baseia-se justamente na interpretação contínua do comportamento real da obra, permitindo ajustes técnicos quando as condições observadas diferem das hipóteses inicialmente consideradas.

Segundo o ICOLD [6], a compreensão adequada das condições de fundação constitui um dos principais fatores para garantia da segurança de barragens, especialmente em estruturas apoiadas sobre depósitos sedimentares heterogêneos, onde a variabilidade espacial da permeabilidade pode favorecer trajetórias preferenciais de fluxo e desenvolvimento de subpressões elevadas. Complementarmente, o ICOLD [7] ainda ressalta que a presença de camadas arenosas confinadas, feições preferenciais de fluxo e materiais erodíveis requer monitoramento contínuo e avaliações periódicas das condições de estabilidade e percolação.

A Barragem de Terra da Margem Esquerda da UHE Jirau constitui um caso representativo dessa problemática. A estrutura possui seção homogênea em terra, com sistema interno de drenagem composto por filtro vertical e tapete drenante, além de drenagem de pé destinada à coleta e condução das águas de percolação. A fundação é constituída predominantemente por terraços fluviais e solos de alteração, com alternância de materiais arenosos e argilosos, condição que favorece contrastes de permeabilidade e resposta piezométrica diferenciada ao longo do barramento.

Após o enchimento inicial do reservatório, leituras piezométricas indicaram níveis d'água superiores aos valores de controle em seções específicas da Barragem de Terra da Margem Esquerda, especialmente na região da estaca 35+00. As análises realizadas à época demonstraram a necessidade de reavaliação da estabilidade dos

taludes de jusante com base nas leituras efetivamente observadas em campo. Posteriormente, novos diagnósticos confirmaram a ocorrência de piezometria elevada na fundação e a necessidade de intervenções para controle de subpressões, incluindo a implantação de poços de alívio e a ampliação do sistema de monitoramento.

Este trabalho apresenta o estudo de caso da Barragem de Terra da Margem Esquerda da UHE Jirau, com ênfase na interpretação dos dados piezométricos, nas retroanálises de estabilidade e na concepção de medidas de controle de percolação por meio de poços de alívio. Busca-se demonstrar como a integração entre instrumentação geotécnica, análise crítica do comportamento observado e modelagem numérica constitui uma ferramenta eficaz para identificação de condições adversas, definição de intervenções e verificação do desempenho de barragens em operação.

2. CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM E DAS CONDIÇÕES DE FUNDAÇÃO

Este tópico apresenta inicialmente as características gerais da Barragem de Terra da Margem Esquerda, incluindo aspectos geométricos e sistemas de drenagem, e, posteriormente, descreve o contexto geológico e geotécnico da fundação, enfatizando os aspectos relacionados à heterogeneidade hidráulica e aos mecanismos potenciais de percolação que fundamentaram as análises desenvolvidas neste trabalho.

2.1. Características gerais da barragem

A Usina Hidrelétrica Jirau, implantada no rio Madeira, no estado de Rondônia, é composta por um conjunto de estruturas de contenção formadas por barragens de terra, barragens de enrocamento com núcleo asfáltico e estruturas de concreto. Dentre essas estruturas, destaca-se a Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME), responsável pelo fechamento lateral do reservatório na margem esquerda do empreendimento.

A BTME desenvolve-se desde a estaca E.83+10 até o encontro com a Casa de Força 2 (CF-02), nas proximidades da estaca E.-17+00, apresentando extensão aproximada de 1.756,5 m ao longo da crista e altura máxima da ordem de 39 m na região próxima à CF-02. A estrutura possui seção homogênea em terra compactada, com largura de crista constante de 10 m e taludes típicos de inclinação 1V:2H tanto a montante quanto a jusante.

A configuração geométrica da BTME é apresentada na Figura 1.

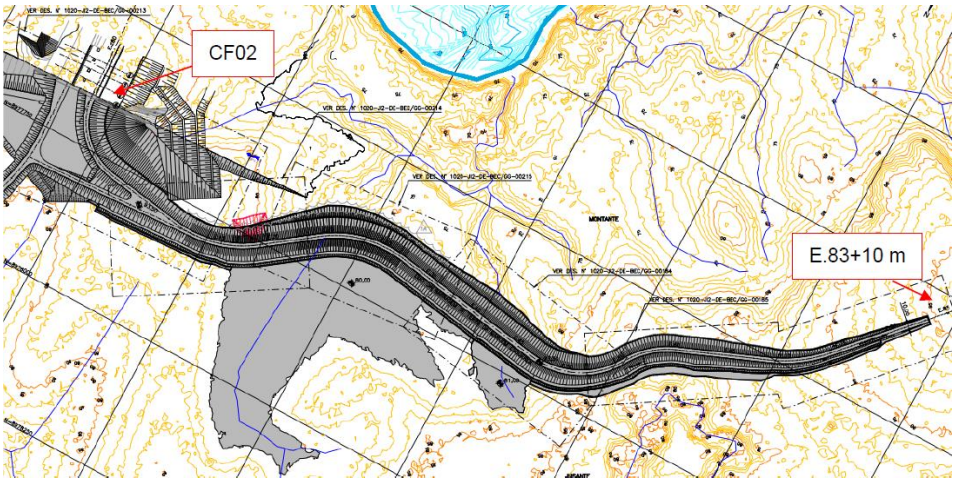


Figura 1 – Planta geral da Barragem de Terra da Margem Esquerda da UHE Jirau.

O sistema interno de drenagem da barragem é composto por filtro vertical associado a tapete drenante do tipo sanduíche, conectado a um dreno de pé em enrocamento destinado à coleta e condução das águas de infiltração do maciço e da fundação. O filtro vertical possui espessura constante de 0,70 m, enquanto o tapete drenante é formado por camadas sucessivas de areia e materiais de transição compactados, concebidos para promover o controle das vazões percoladas e a dissipação das poropressões internas.

No espaldar de montante, a proteção superficial é realizada por enrocamento arrumado (rip-rap) entre a elevação 80,0 m e a crista da barragem, enquanto o trecho inferior recebe proteção em material granular solto. Já o talude de jusante é protegido predominantemente por enrocamento compactado. A seção típica da barragem e seu sistema de drenagem são apresentados na Figura 2.

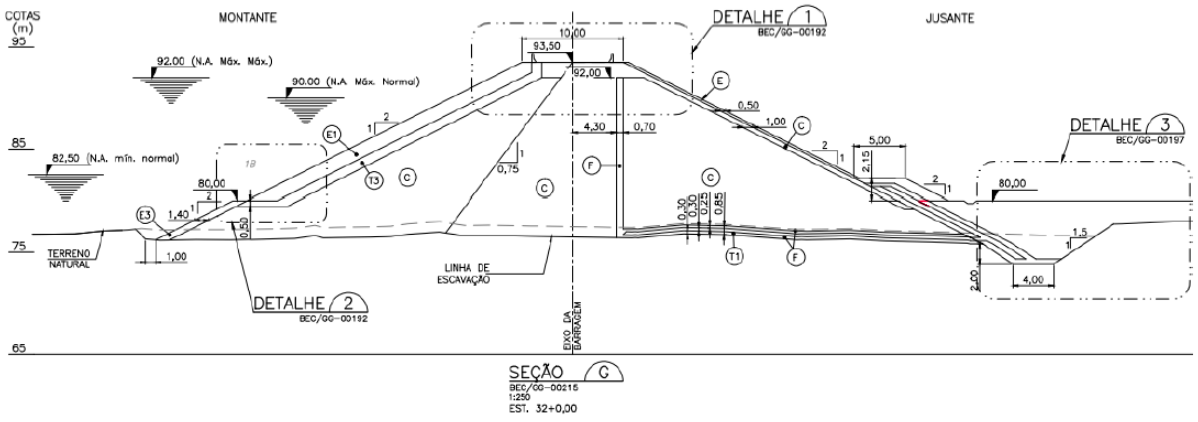


Figura 2 – Seção típica da Barragem de Terra da Margem Esquerda, destacando o sistema interno de drenagem.

O sistema de instrumentação da BTME é constituído por piezômetros instalados ao longo do maciço e da fundação, distribuídos em diferentes seções da barragem, permitindo o acompanhamento da evolução das poropressões ao longo da operação. A instrumentação foi concebida para monitorar tanto o comportamento hidráulico do maciço quanto as condições de percolação na fundação, subsidiando avaliações de estabilidade e desempenho hidráulico da estrutura.

2.2. Contexto geológico e geotécnico

A fundação da Barragem de Terra da Margem Esquerda caracteriza-se pela presença de depósitos aluvionares associados aos terraços fluviais da Formação Jaci-Paraná, constituídos por sedimentos de origem fluvial predominantemente arenosos, siltosos e argilosos, cuja deposição resultou em elevada heterogeneidade litológica e hidráulica (CPRM; FURNAS, 2005) [8]. As investigações geológico-geotécnicas desenvolvidas durante o projeto executivo evidenciaram a predominância de camadas alternadas de solos arenosos e argilosos, localmente intercaladas por horizontes orgânicos e materiais de alteração de rocha granítica, configurando um meio estratificado de comportamento hidrogeotécnico complexo (LEME ENGENHARIA, 2013) [9].

Nas regiões fundadas em solo, predominam terraços fluviais e solos de alteração, enquanto nas proximidades da Casa de Força 2 a barragem passa a se apoiar sobre rocha granítica sã. Em termos construtivos, as escavações da fundação buscaram remover materiais superficiais de baixa resistência até atingir condições mínimas compatíveis com os critérios geotécnicos de projeto.

Na região posteriormente identificada como crítica para o comportamento piezométrico da fundação, observa-se perfil geotécnico caracterizado pela alternância sucessiva de horizontes arenosos e argilosos. Conforme apresentado nas análises de percolação desenvolvidas durante o projeto executivo, a fundação é composta, em profundidade, por camadas de terraço aluvionar argiloso (TRag1), terraço aluvionar arenoso (TRar1 e TRar4), horizonte de argila orgânica (TRao), solos de alteração granítica (S2Gr) e topo rochoso.

A seção geológico-geotécnica representativa da fundação é apresentada na Figura 3.

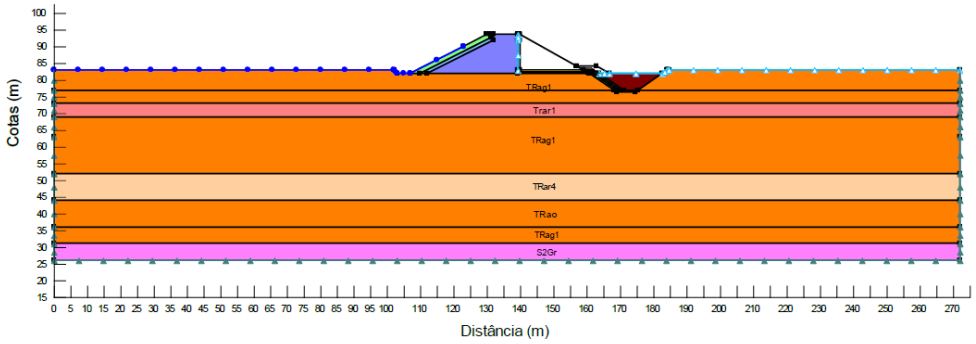


Figura 3 – Seção geológico-geotécnica representativa da fundação da BTME utilizada nas análises de percolação.

Os materiais arenosos identificados na fundação apresentam permeabilidades significativamente superiores às camadas argilosas adjacentes, estabelecendo contrastes hidráulicos expressivos. Nas análises de percolação executadas em projeto, os coeficientes de permeabilidade adotados para os horizontes arenosos atingiram magnitudes da ordem de 10^{-3} a 10^{-2} cm/s, enquanto os materiais argilosos apresentaram valores da ordem de 10^{-5} a 10^{-4} cm/s. Essa diferença favorece a concentração de fluxo em horizontes mais permeáveis e dificulta a dissipação uniforme das subpressões na fundação.

Os coeficientes de permeabilidade adotados nas análises corresponderam aos mesmos parâmetros empregados nas memórias de cálculo de percolação

desenvolvidas durante o projeto executivo da BTME, oriundos dos ensaios realizados à época. Conforme descrito na documentação de projeto, esses valores foram mantidos nas análises numéricas, sendo adotado fator de majoração igual a 10 para os materiais não granulares, como forma de contemplar incertezas associadas às propriedades hidráulicas da fundação. Os parâmetros hidráulicos considerados nas análises de percolação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes de permeabilidade adotados para os materiais da fundação e do maciço.

Materiais	**Coeficientes de Permeabilidades - k (cm/s)**	
	Sem fator de majoração (FM)	**Com fator de majoração**
Fundação em rocha de granito são	$1{,}0 \times 10^{-5}$	$1{,}0 \times 10^{-4}$
Solo de terraço aluvionar arenoso – Trar 1	$1{,}0 \times 10^{-3}$	$1{,}0 \times 10^{-2}$
Solo de terraço aluvionar arenoso – Trar 4	$5{,}0 \times 10^{-3}$	$5{,}0 \times 10^{-2}$
Solo de Terraço Argiloso de Argila Orgânica - TRao	$1{,}0 \times 10^{-5}$	$1{,}0 \times 10^{-4}$
Solo de Alteração de Granito – S2Gr	$5{,}0 \times 10^{-5}$	$5{,}0 \times 10^{-4}$
Solo de terraço argiloso – Trag1	$1{,}0 \times 10^{-5}$	$1{,}0 \times 10^{-4}$
Maciço em solo areno silto e/ou argiloso compactado	$kh = 5{,}0 \times 10^{-6}$ $kv = 5{,}0 \times 10^{-7}$	$kh = 5{,}0 \times 10^{-5}$ $kv = 5{,}0 \times 10^{-6}$
Reaterro do dreno de pé	$5{,}0 \times 10^{-3}$	$5{,}0 \times 10^{-2}$
Filtro de areia compactado	10^{-2}	10^{-2}
Transição compactada	1,0	1,0
Enrocamento compactado	1,0	1,0

Devido à complexidade das condições geológico-geotécnicas observadas, o projeto da BTME incorporou diferentes medidas de tratamento de fundação voltadas à redução de permeabilidade, homogeneização do fluxo e controle de subpressões. Dentre essas medidas destacam-se os tratamentos superficiais, drenagens profundas e, posteriormente, a implantação de poços de alívio em regiões específicas da barragem, em resposta ao comportamento hidráulico observado durante a operação do reservatório.

3. COMPORTAMENTO PIEZOMÉTRICO OBSERVADO APÓS O ENCHIMENTO

O enchimento inicial de reservatórios constitui uma das etapas mais críticas do comportamento de barragens de terra, uma vez que representa a primeira solicitação hidráulica significativa imposta ao maciço e à fundação. Segundo o ICOLD [6], é durante essa fase que frequentemente se manifestam condições não previstas em projeto, relacionadas à resposta hidráulica da fundação, desenvolvimento de subpressões e comportamento dos sistemas de drenagem.

De acordo com Silveira [4], a interpretação do comportamento piezométrico após o enchimento permite avaliar a eficiência dos dispositivos de drenagem, validar hipóteses adotadas em projeto e identificar precocemente condições potencialmente associadas a instabilidades hidráulicas. Fell et al. [2] ressaltam ainda que a instrumentação piezométrica representa um dos principais mecanismos de detecção

preventiva de processos relacionados à erosão interna, especialmente em barragens fundadas sobre depósitos heterogêneos.

Na Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME) da UHE Jirau, o comportamento piezométrico passou a ser acompanhado continuamente após o enchimento inicial do reservatório, permitindo avaliar a resposta hidráulica da fundação ao longo dos primeiros ciclos hidrológicos de operação. A análise histórica das leituras obtidas entre os períodos hidrológicos de 2013/2014, 2014/2015 e 2015/2016 indicou comportamento globalmente estável da instrumentação, com oscilações sazonais compatíveis com as variações dos níveis do reservatório e de jusante na maior parte da barragem. Entretanto, em algumas seções específicas foram registrados níveis piezométricos superiores aos níveis de controle estabelecidos em projeto, indicando comportamento distinto daquele inicialmente previsto.

Os resultados do monitoramento evidenciaram que os maiores desvios ocorreram nas seções monitoradas pelas estacas E.35+00 (PZ-ME-13 a PZ-ME-16), E.45+00 (PZ-ME-18 a PZ-ME-20), E.55+00 (PZ-ME-23), E.62+00 (PZ-ME-25) e E.70+00 (PZ-ME-28), onde foram observados níveis piezométricos superiores aos respectivos níveis de controle definidos para a operação da barragem (THEMAG, 2014)[10]. Embora a maioria dessas seções tenha apresentado fatores de segurança compatíveis com os critérios de projeto, as leituras evidenciaram a influência da heterogeneidade hidráulica da fundação sobre a distribuição das poropressões.

A Tabela 2 apresenta um resumo das principais seções em que foram registrados níveis piezométricos acima dos valores de controle durante o período analisado.

Tabela 2 – Síntese das seções com níveis piezométricos superiores aos níveis de controle.

Estaca	Piezômetros	Situação observada	FS obtido*
E.35+00	PZ-ME-13 a PZ-ME-16	Níveis acima do controle e artesianismo	**1,46**
E.45+00	PZ-ME-18 a PZ-ME-20	Níveis acima do controle	1,79
E.55+00	PZ-ME-23	Níveis acima do controle	1,85
E.62+00	PZ-ME-25	Níveis acima do controle	1,71
E.70+00	PZ-ME-28	Nível acima do controle	—

***Condição correspondente às análises realizadas em março de 2014.**

A figura a seguir apresenta a seção instrumentada na E.35+00.

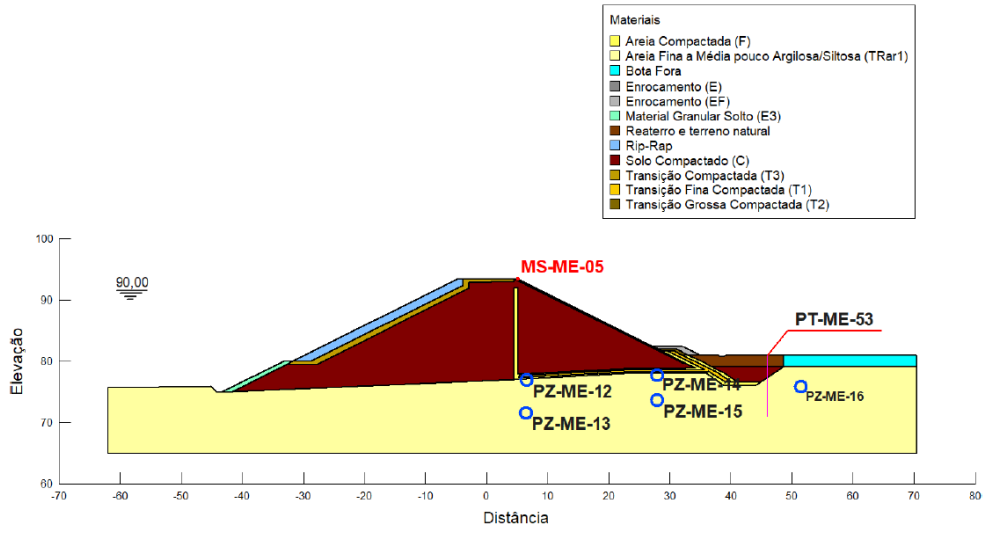


Figura 4 –Seção instrumentada E.35+00.

Dentre as seções avaliadas, a estaca E.35+00 apresentou o comportamento mais crítico. Nessa região, além da persistência de níveis piezométricos elevados durante os períodos de cheia, foi registrada ocorrência recorrente de artesianismo no piezômetro PZ-ME-16, indicando manutenção de elevadas subpressões na fundação. As análises de estabilidade desenvolvidas com base na piezometria observada em março de 2014 resultaram em fator de segurança igual a 1,46 para a condição correspondente ao nível do reservatório na elevação 88,44 m. Quando extrapolada para a condição de Nível Máximo Normal (NA = 90,00 m), a mesma seção apresentou FS = 1,42, valor inferior ao critério mínimo de projeto (FS ≥ 1,50), evidenciando a necessidade de intervenções para controle da percolação.

O histórico temporal das leituras piezométricas na seção crítica é apresentado na Figura 5, na qual se observa a resposta da instrumentação às variações do nível do reservatório e a persistência de cargas hidráulicas superiores aos níveis de controle estabelecidos em projeto. As análises foram efetuadas através do programa SEEP/W, que utiliza o método de elementos finitos para análise bidimensional de fluxo, livre e confinado d'água, através de meios porosos.

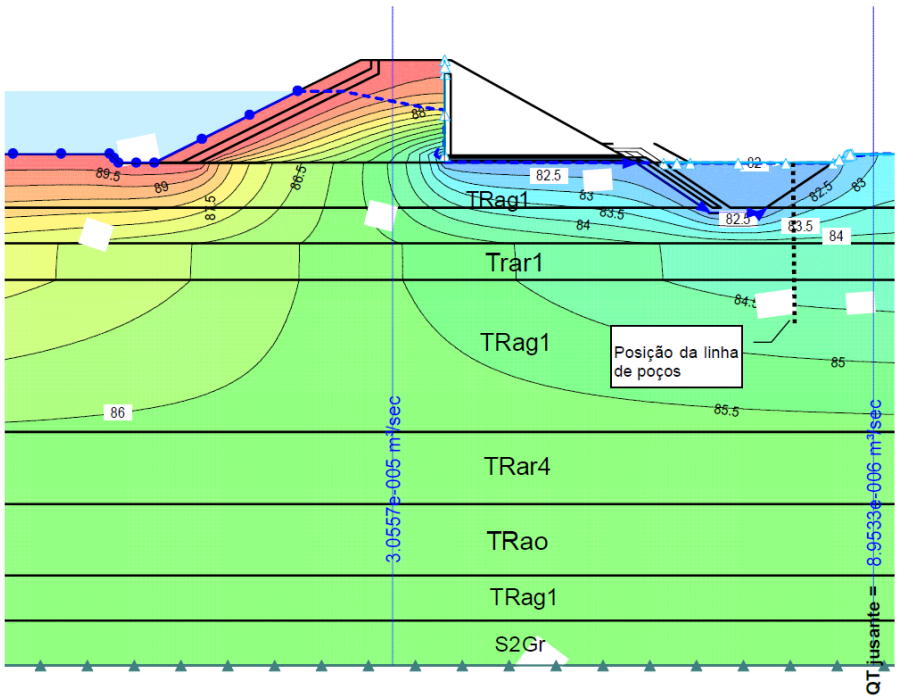


Figura 5 – Resultado das análises de percolação e equipotenciais para a condição sem poços de alívio.

A interpretação integrada das leituras piezométricas e das análises de percolação demonstrou que a estratigrafia heterogênea da fundação favorecia a concentração do fluxo nos horizontes arenosos mais permeáveis, dificultando a dissipação das pressões neutras e resultando em condições localizadas de subpressão elevada. As simulações numéricas reproduziram adequadamente esse comportamento, evidenciando concentração do fluxo subterrâneo na região crítica da fundação, conforme ilustrado na Figura 6.

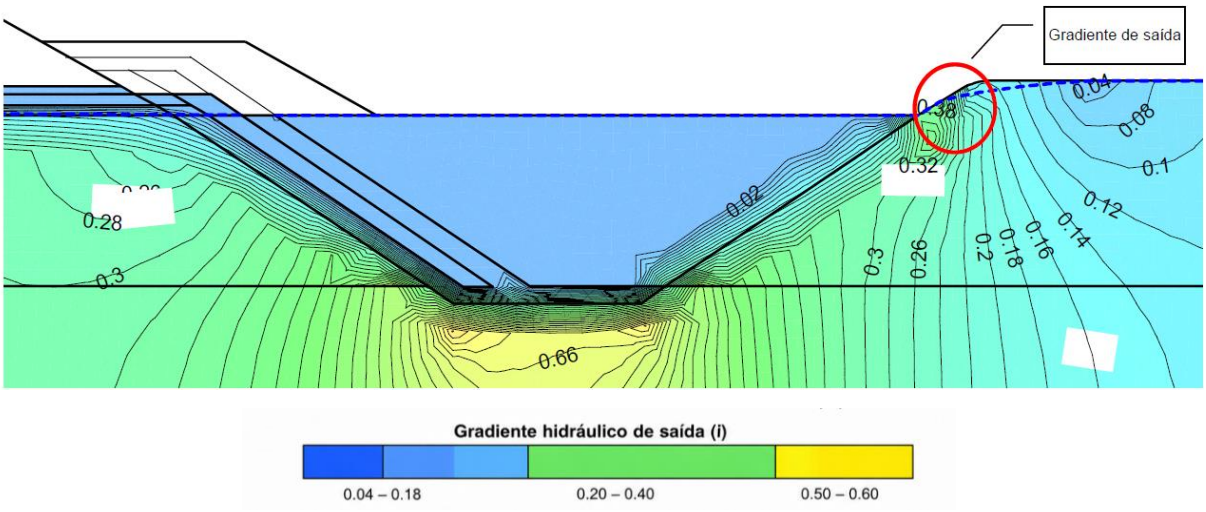


Figura 6 – Distribuição dos gradientes hidráulicos de saída na fundação da BTME sem poços de alívio.

A consistência entre os resultados da instrumentação e das simulações numéricas confirmou que a condição observada na estaca E.35+00 não correspondia a uma variação pontual de monitoramento, mas sim ao comportamento hidráulico da fundação naquela região. Esse diagnóstico fundamentou a realização das retroanálises de estabilidade e subsidiou a definição da solução de engenharia baseada na implantação de poços de alívio.

4. RETROANÁLISES E AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE

A interpretação do comportamento piezométrico observado após o enchimento do reservatório evidenciou a necessidade de reavaliação das condições de estabilidade da Barragem de Terra da Margem Esquerda, particularmente nas regiões onde foram registrados níveis piezométricos superiores aos previstos em projeto, conforme mencionado anteriormente. Segundo Peck [5], a abordagem observacional aplicada à engenharia geotécnica pressupõe justamente a reinterpretação contínua do comportamento da estrutura a partir dos dados instrumentais obtidos em campo, permitindo atualização das hipóteses de análise e adoção de medidas corretivas quando necessário.

No contexto de barragens de terra, Fell et al. [2] destacam que retroanálises calibradas com dados reais de instrumentação representam uma ferramenta essencial para avaliação das condições efetivas de segurança da estrutura, sobretudo em fundações heterogêneas sujeitas a comportamentos hidráulicos complexos. O ICOLD [7] reforça que a utilização de linhas piezométricas representativas das condições observadas em campo constitui prática recomendada em análises de estabilidade de barragens em operação.

4.1. Definição das linhas piezométricas representativas

A definição das linhas piezométricas utilizadas nas análises de estabilidade foi realizada com base na interpretação integrada das leituras instrumentais obtidas após

o enchimento do reservatório, associada às análises de percolação desenvolvidas para a fundação da BTME. O procedimento buscou compatibilizar o comportamento hidráulico efetivamente observado em campo com os modelos numéricos utilizados nas verificações de estabilidade.
Foram consideradas, para fins de análise, as condições mais críticas registradas pelo sistema de instrumentação, especialmente nas regiões onde se observaram elevações persistentes dos níveis piezométricos e ocorrência localizada de artesianismo. As leituras indicaram comportamento hidráulico condicionado pela presença de horizontes arenosos confinados entre camadas argilosas menos permeáveis, favorecendo o desenvolvimento de subpressões elevadas na fundação.

Conforme apresentado anteriormente, a análise do histórico de monitoramento piezométrico identificou a seção da estaca E.35+00 como a condição mais crítica da BTME, caracterizada por níveis piezométricos superiores aos valores de controle, ocorrência recorrente de artesianismo no piezômetro PZ-ME-16 e fator de segurança inferior ao critério de projeto. Em função desse comportamento, essa seção foi adotada como referência para as retroanálises de estabilidade.

A compatibilização entre instrumentação e modelagem numérica permitiu calibrar as condições hidráulicas da fundação de forma mais representativa do comportamento real da estrutura. Segundo Silveira [4], esse procedimento reduz incertezas associadas às hipóteses de projeto e aumenta a confiabilidade das análises de segurança em barragens instrumentadas.

4.2. Análises de estabilidade

As análises de estabilidade da BTME foram desenvolvidas por meio de métodos de equilíbrio limite, amplamente empregados em avaliações geotécnicas de barragens de terra. Conforme descrito por Duncan, Wright e Brandon [11], os métodos de equilíbrio limite permitem estimar a condição de estabilidade a partir da relação entre esforços resistentes e solicitantes ao longo de superfícies potenciais de ruptura.

As verificações foram executadas considerando as condições hidráulicas compatibilizadas com os níveis piezométricos observados em campo, incorporando os efeitos das subpressões atuantes na fundação e no maciço. As análises concentraram-se especialmente nas seções onde os registros instrumentais indicaram comportamento mais crítico, com destaque para a região da estaca 35+00.

As verificações contemplaram a condição de operação permanente correspondente ao Nível Máximo Normal (NA = 90,0 m), conforme as hipóteses adotadas nas análises de projeto e nas retroanálises realizadas. Embora o empreendimento possua Nível Máximo Maximorum (NA = 92,0 m) para eventos hidrológicos excepcionais, a condição analisada corresponde ao carregamento operacional permanente da estrutura.

Os critérios de aceitação adotados seguiram as recomendações usualmente aplicadas a barragens de terra em condição operacional permanente, considerando fator de segurança mínimo igual ou superior a 1,50 para estabilidade global. Tal critério está em consonância com recomendações do ICOLD [6], Eletrobras [12] e demais literaturas.

4.3. Resultados obtidos

As retroanálises desenvolvidas a partir das condições piezométricas observadas em campo indicaram redução significativa dos fatores de segurança em determinadas regiões da BTME. Para a condição operacional correspondente ao nível máximo normal do reservatório, as análises apontaram fator de segurança mínimo da ordem de 1,47 na seção crítica avaliada (THEMAG, 2014)[13].

Esse resultado mostrou-se inferior ao critério mínimo de projeto adotado para a estrutura (FS ≥ 1,50), evidenciando condição marginal de estabilidade associada às elevadas subpressões observadas na fundação. Segundo Fell et al. [2], reduções localizadas de fator de segurança em barragens sobre fundações heterogêneas frequentemente estão associadas à influência de poropressões elevadas e trajetórias preferenciais de fluxo.

Além da redução do fator de segurança, as análises hidráulicas indicaram gradientes elevados na região de saída do fluxo, associados à presença de materiais arenosos potencialmente erodíveis na fundação. Conforme Foster et al. [3], a combinação entre gradientes elevados, materiais suscetíveis à erosão e fluxo concentrado constitui condição potencialmente favorável ao desenvolvimento piping.

Os resultados obtidos evidenciaram que, embora a estrutura não apresentasse condição iminente de ruptura, o comportamento hidráulico da fundação indicava necessidade de intervenção preventiva para controle das subpressões e aumento das margens de segurança da barragem. Dessa forma, optou-se pela concepção e implantação de sistema complementar de drenagem profunda composto por poços de alívio distribuídos ao longo do pé de jusante da estrutura.

5. RETROANÁLISES E AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE

As análises desenvolvidas a partir da instrumentação e das retroanálises de estabilidade evidenciaram a necessidade de adoção de medidas complementares de controle de percolação e redução de subpressões na fundação da Barragem de Terra da Margem Esquerda. Segundo o ICOLD [7], intervenções destinadas ao controle hidráulico da fundação devem priorizar a redução de gradientes de saída, o alívio de pressões neutras e a mitigação de mecanismos potenciais de erosão interna, especialmente em fundações aluvionares heterogêneas.

No caso da BTME, as avaliações executadas após o enchimento do reservatório demonstraram que a drenagem originalmente prevista em projeto não era suficiente para interceptar integralmente determinados horizontes arenosos profundos da fundação, favorecendo a manutenção de níveis piezométricos elevados e ocorrência localizada de artesianismo. Nesse contexto, optou-se pela implantação de sistema complementar de drenagem profunda por meio de poços de alívio instalados ao longo do pé de jusante da barragem.

5.1. Concepção do sistema de drenagem

A solução adotada para controle das subpressões consistiu na implantação de poços de alívio distribuídos ao longo das regiões críticas identificadas pela instrumentação e pelas análises geológico-geotécnicas. A concepção dos poços fundamentou-se na

necessidade de interceptar os horizontes arenosos mais permeáveis da fundação, promovendo o alívio das pressões neutras e reduzindo os gradientes hidráulicos de saída.

Conforme descrito nos documentos de projeto, o conceito original da drenagem da BTME previa que a trincheira drenante de jusante alcançasse diretamente as camadas de terraço arenoso (TRar), permitindo adequada coleta e dissipação das vazões percoladas. Entretanto, em determinadas regiões da fundação, a espessura dos horizontes argilosos (TRag) mostrou-se superior à profundidade executada para a trincheira drenante, comprometendo parcialmente sua eficiência hidráulica.

Nessas condições, a permanência de camadas menos permeáveis sobrejacentes aos horizontes arenosos dificultava a dissipação das subpressões, favorecendo a ocorrência de níveis piezométricos elevados e gradientes hidráulicos excessivos. A solução por poços de alívio foi então concebida como mecanismo complementar de drenagem profunda, destinado a estabelecer conexão hidráulica entre os horizontes permeáveis da fundação e o sistema drenante de jusante. A Figura 7 apresenta o detalhe típico adotado para os poços de alívio implantados na BTME.

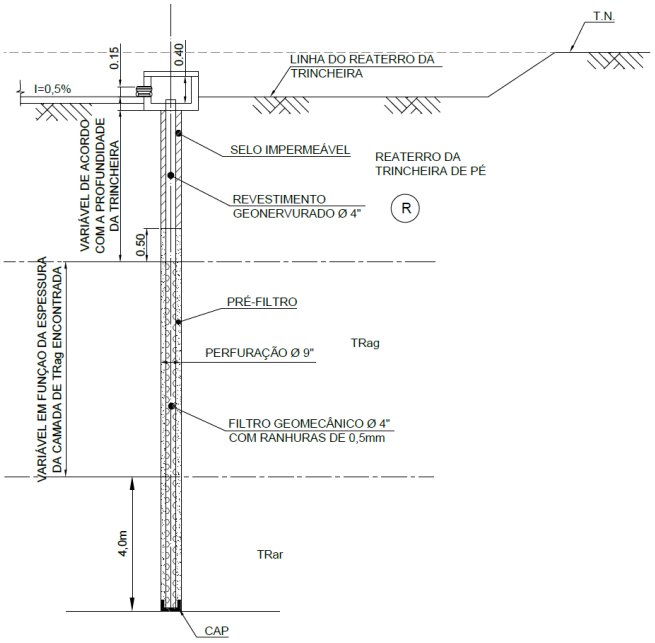


Figura 7 – Detalhe típico dos poços de alívio implantados na BTME.

Os poços foram executados com tubos geomecânicos ranhurados, associados à utilização de pré-filtro granular entre o revestimento e o furo, solução concebida para garantir capacidade de vazão adequada e desempenho hidráulico de longo prazo. Segundo o ICOLD [6], dispositivos drenantes destinados ao controle de subpressões devem priorizar durabilidade, capacidade hidráulica e estabilidade interna dos materiais filtrantes.

Com base nas análises da instrumentação e no mapeamento geológico-geotécnico da fundação, foram definidas regiões prioritárias para implantação dos poços, especialmente nos trechos compreendidos entre as estacas E.20+00 e E.47+00, onde foram identificados registros de artesianismo e níveis piezométricos acima dos limites de controle.

A distribuição espacial dos poços de alívio implantados na BTME é apresentada na Figura 8.

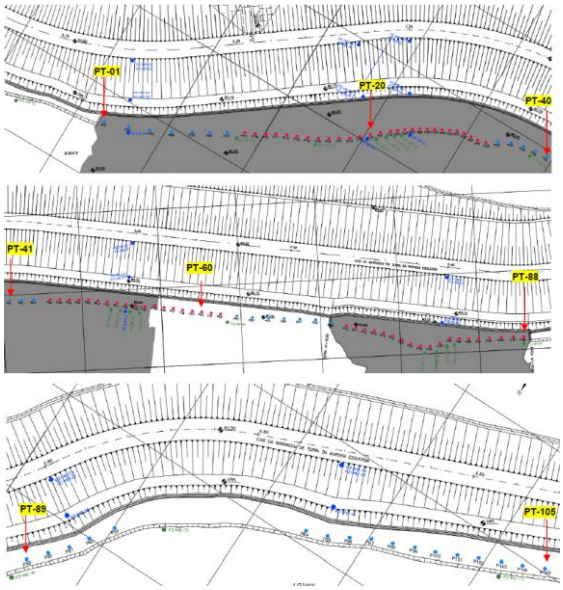


Figura 8 – Localização dos poços de alívio implantados ao longo da BTME.

Ao final das intervenções, a BTME passou a contar com 137 poços de alívio instalados ao longo do pé de jusante, distribuídos conforme as condições geológico-geotécnicas e os resultados da instrumentação.

5.2. Simulações e desempenho esperado

As simulações executadas após a definição da solução de drenagem indicaram redução significativa das subpressões na fundação e melhoria das condições de estabilidade da barragem. As análises consideraram a operação dos poços de alívio em funcionamento, incorporando o rebaixamento da linha piezométrica na fundação.

Segundo os estudos desenvolvidos pela projetista THEMAG, a implantação dos poços promoveria redução dos gradientes hidráulicos de saída e controle mais eficiente do fluxo pela fundação, permitindo restabelecimento das condições mínimas de segurança da estrutura.

A Figura 9 apresenta a configuração da linha piezométrica simulada para a condição com poços de alívio em operação.

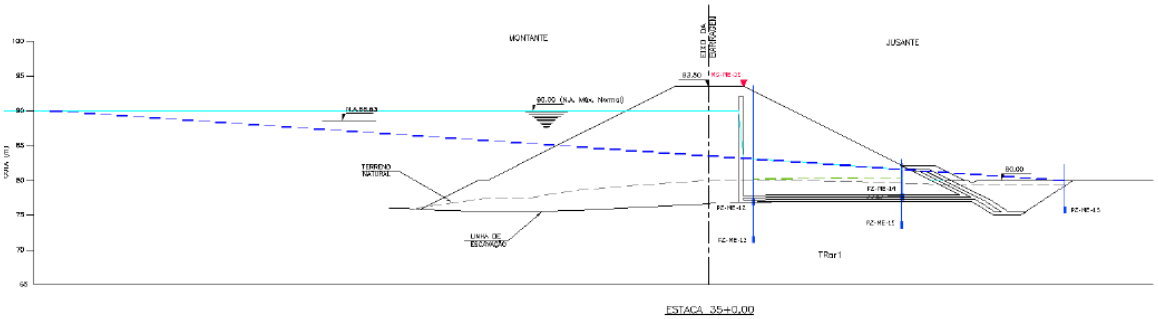


Figura 9 – Linha piezométrica simulada na fundação considerando os poços de alívio em funcionamento.

Os resultados demonstraram rebaixamento significativo da linha piezométrica na fundação, particularmente nas regiões anteriormente afetadas por artesianismo e elevados níveis de subpressão (THEMAG, 2012)[14].

Com a redução das poropressões atuantes, as análises de estabilidade indicaram incremento dos fatores de segurança da barragem. Para a seção crítica da estaca 35+00, o fator de segurança passou de valores inferiores ao critério mínimo admissível para valores da ordem de 1,70 a 1,74, dependendo das hipóteses e parâmetros considerados nas análises.

A Figura 10 apresenta exemplo das análises de estabilidade considerando os poços de alívio em funcionamento.

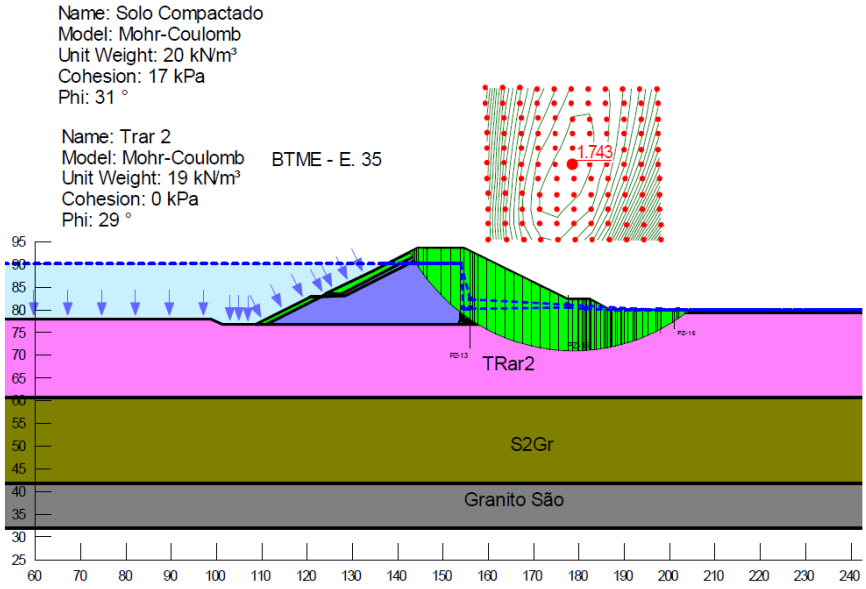


Figura 10 – Análise de estabilidade da BTME considerando o funcionamento dos poços de alívio.

Os resultados obtidos demonstraram que a implantação dos poços de alívio promoveu melhoria substancial das condições hidráulicas e geotécnicas da fundação, reduzindo os riscos associados ao desenvolvimento de erosão interna e restabelecendo margens adequadas de segurança para a operação da estrutura.

5.3. Monitoramento após implantação

As avaliações posteriores à implantação dos poços de alívio indicaram comportamento satisfatório do sistema de drenagem complementar adotado na BTME. Conforme descrito na Revisão Periódica de Segurança da Barragem, as análises da instrumentação demonstraram que as medidas implementadas se mostraram compatíveis com os critérios atuais de segurança e com as práticas de engenharia aplicáveis a barragens de terra. A figura a seguir demonstra os poços de alívio pós-implantação.



Figura 11 – Poços de Alívio implantados.

A implantação do sistema de poços de alívio foi acompanhada pela continuidade do monitoramento piezométrico da fundação, permitindo verificar, em campo, a resposta hidráulica da barragem após a execução da intervenção. Conforme recomendado pelo ICOLD (2014) e pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2016), o acompanhamento sistemático da instrumentação constitui etapa essencial para validação do desempenho de medidas corretivas implementadas em barragens de terra, permitindo verificar se as condições observadas correspondem ao comportamento previsto nas análises de projeto.

As avaliações realizadas após a implantação dos poços de alívio indicaram comportamento satisfatório do sistema de drenagem complementar adotado na Barragem de Terra da Margem Esquerda. Conforme registrado na Revisão Periódica de Segurança da Barragem e nas análises da instrumentação desenvolvidas para o empreendimento, não foram identificadas evidências de agravamento das condições hidráulicas anteriormente observadas, indicando desempenho compatível com os critérios atuais de segurança e com as boas práticas aplicáveis à operação de barragens de terra (THEMAG, 2016).

A Figura 12 apresenta a evolução histórica das leituras piezométricas da Seção D (Estaca E.35+00), correspondente ao trecho mais crítico da fundação e que motivou a implantação dos poços de alívio. O gráfico reúne as leituras dos piezômetros PZ-ME-12 a PZ-ME-16, complementadas pelos instrumentos PZ-ME-60 a PZ-ME-63, instalados posteriormente para ampliar o monitoramento da região, além dos registros dos níveis de montante e de jusante do reservatório.

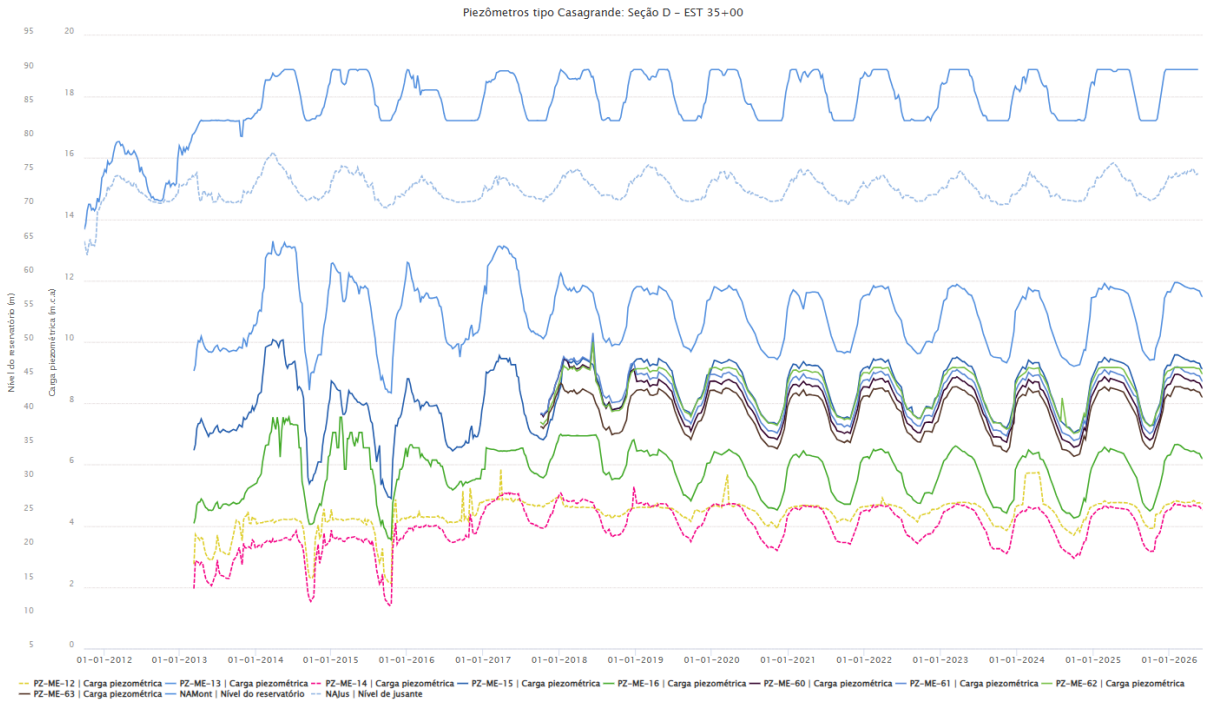


Figura 12 – Evolução histórica das cargas piezométricas na Seção D (Estaca E.35+00), com indicação dos níveis de montante e jusante do reservatório.

Observa-se que, após a implantação dos poços de alívio e a estabilização operacional da barragem, as leituras passaram a apresentar comportamento predominantemente cíclico, acompanhando as oscilações sazonais do nível do reservatório. As variações registradas permaneceram compatíveis com o regime operacional da usina, sem tendência de crescimento progressivo das cargas piezométricas ao longo do período monitorado.

Além disso, verifica-se que os piezômetros da seção crítica passaram a responder de forma coerente entre si, mantendo amplitudes semelhantes e comportamento repetitivo entre os ciclos hidrológicos anuais. Esse padrão evidencia que a fundação passou a apresentar resposta hidráulica estável, indicando que as subpressões permaneceram controladas pelo sistema de drenagem implantado.

Os resultados do monitoramento são coerentes com as retroanálises desenvolvidas para a seção E.35+00. Enquanto a condição anterior à implantação dos poços indicava fator de segurança mínimo de aproximadamente 1,47 para o nível máximo normal do reservatório, as simulações considerando o funcionamento do sistema de drenagem profunda indicaram incremento desse fator para aproximadamente 1,74, restabelecendo margem de segurança superior ao critério mínimo de projeto (FS ≥ 1,50) (THEMAG, 2014).

A convergência entre os resultados observados em campo e as previsões obtidas pelas análises numéricas constitui importante evidência da efetividade da solução adotada. O comportamento piezométrico registrado após a implantação dos poços de alívio demonstra que a instrumentação geotécnica não apenas subsidiou o diagnóstico inicial da condição crítica da fundação, mas também permitiu validar o desempenho da intervenção ao longo da operação da barragem, reforçando o papel do monitoramento contínuo como ferramenta fundamental para a gestão da segurança de barragens.

A continuidade do monitoramento piezométrico e das avaliações periódicas permanece fundamental para verificação do comportamento hidráulico da fundação ao longo da operação da barragem. Segundo o ICOLD [6], barragens fundadas sobre depósitos sedimentares heterogêneos requerem acompanhamento contínuo da instrumentação, mesmo após implantação de medidas corretivas, devido à possibilidade de alterações graduais nas condições de fluxo e percolação ao longo do tempo.

6. CONCLUSÕES

O estudo de caso da Barragem de Terra da Margem Esquerda da UHE Jirau evidenciou a importância da instrumentação geotécnica e da abordagem observacional na avaliação do comportamento hidráulico e da segurança de barragens fundadas sobre depósitos aluvionares heterogêneos. As leituras piezométricas obtidas após o enchimento do reservatório permitiram identificar condições não previstas integralmente nas hipóteses originais de projeto, caracterizadas pela ocorrência de níveis piezométricos elevados, artesianismo localizado e gradientes hidráulicos superiores aos valores de controle em determinados trechos da fundação.

A interpretação integrada entre instrumentação, análises de percolação e retroanálises de estabilidade demonstrou que os horizontes arenosos confinados entre camadas argilosas menos permeáveis favoreceram o desenvolvimento de subpressões elevadas na fundação, reduzindo as tensões efetivas e impactando diretamente as condições de estabilidade da estrutura. As análises executadas para a condição operacional correspondente ao nível máximo normal do reservatório indicaram fator de segurança inferior ao critério mínimo adotado em projeto, evidenciando condição potencialmente favorável ao desenvolvimento de processos de erosão interna.

A solução de engenharia adotada, baseada na implantação de sistema complementar de drenagem profunda por meio de poços de alívio, mostrou-se adequada para o controle hidráulico da fundação. As simulações desenvolvidas indicaram redução significativa das subpressões, rebaixamento da linha piezométrica e incremento dos fatores de segurança para valores compatíveis com os critérios geotécnicos aplicáveis à estrutura.

As avaliações posteriores à implantação dos poços de alívio, associadas ao acompanhamento contínuo da instrumentação, indicaram desempenho satisfatório do sistema drenante complementar e comportamento compatível com as condições esperadas para a operação segura da barragem. Os resultados reforçam a importância do monitoramento contínuo como ferramenta essencial para validação do desempenho das medidas corretivas e para identificação precoce de eventuais alterações no comportamento hidráulico da fundação.

Por fim, o caso da BTME da UHE Jirau demonstra que a integração entre instrumentação geotécnica, retroanálises calibradas e modelagem numérica constitui ferramenta fundamental para a gestão da segurança de barragens em operação, especialmente em estruturas implantadas sobre fundações geologicamente complexas.

Os resultados obtidos corroboram as recomendações da Agência Nacional de Águas (ANA, 2016)[15], que destacam o monitoramento como elemento fundamental para a gestão da segurança de barragens.

A experiência obtida reforça ainda a relevância da abordagem observacional como mecanismo de suporte à tomada de decisão, permitindo o desenvolvimento de soluções compatíveis com o comportamento real da estrutura e contribuindo para o aumento das margens de segurança ao longo da vida útil da barragem.

7. PALAVRAS-CHAVE

Barragem de Terra; Piezometria; Subpressão; Poços de alívio; Coeficiente de Segurança.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CRUZ, P. T. 100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projeto. Oficina de Textos, 1996, São Paulo, Brasil.

[2] FELL, R. (2007) – "The Mechanics of Internal Erosion and Piping of Embankment Dams and Their Foundations", Proceedings of the 10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Brisbane, Austrália.

[3] FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNANGLE, M. (2000) – "The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents", Canadian Geotechnical Journal, v. 37, Canadá.

[4] SILVEIRA, J. F. A. (2006) – Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

[5] PECK, R. B. (1969) – "Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics", Géotechnique, volume 19, nº 2, Londres.

[6] ICOLD (2014) – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Dam Surveillance Guide. Bulletin 158. Paris.

[7] ICOLD (2015) – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and Their Foundations. Bulletin. Paris.

[8] CPRM; FURNAS. Projeto Rio Madeira – Relatório Final de Geologia das Áreas dos Aproveitamentos Hidrelétricos de Jirau e Santo Antônio. Porto Velho, 2005.

[9] LEME ENGENHARIA. Projeto Executivo – Barragem de Terra da Margem Esquerda – Fundação em Rocha – Trecho de Seção Homogênea. Documento nº 1020-JI3-DE-USC-TR-00002-00. Jirau Energia S.A., 27 fev. 2013.

[10] THEMAG ENGENHARIA. (2014) – "1020-JI2-RT-BEC/IN-00003-00 – Análise dos Resultados da Monitoração", Projeto UHE Jirau. Porto Velho-RO.

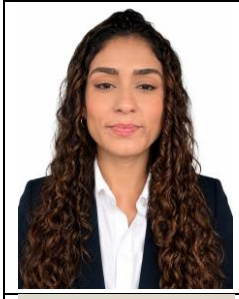
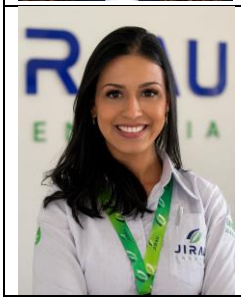
[11] DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. (2014) – "Soil Strength and Slope Stability", 2ª edição, John Wiley & Sons, Hoboken.

[12] ELETROBRAS. (2003) - Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Rio de Janeiro.

[13] THEMAG ENGENHARIA. (2014) – 1020-JI2-MC-BEC/GG-00030-0B – Memória de Cálculo de Estabilidade da Barragem de Terra da Margem Esquerda. Projeto UHE Jirau. Porto Velho-RO.

[14] THEMAG ENGENHARIA. (2012) – *1020-JI2-MC-BEC/GG-00029-00 – Memória de Cálculo das Análises de Percolação da BTME*. Projeto UHE Jirau. Porto Velho-RO.

[15] ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (2016) – "Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens", Brasília.

	**Stella LANA DE SOUZA** Engenheira Civil formada pelo Instituto Federal de Rondônia (IFRO), especialista em Engenharia Geotécnica e Estruturas Hidráulicas, pós-graduanda em Segurança de Barragens pelo IPT. Atua como Engenheira Civil na UHE Jirau, diretamente na área de Segurança de Barragens do empreendimento.
	**Jakelline JARD DA SILVA** Coordenadora de Manutenção Civil e Segurança de Barragens na Jirau Energia. Graduada em Engenharia Civil de Infraestrutura pela Universidade Federal da Integração Latino-Americana, atualmente cursa pós-graduação em Gestão Empresarial pela Fundação Getulio Vargas.

DEFINITION OF A TRIGGER ACTION RESPONSE PLAN FOR MONITORING DOLOMITE DISSOLUTION IN THE FOUNDATION OF A TAILINGS DAM

BARROS, Henrique Teixeira Godoi de
Civil Engineer - Pimenta de Ávila

FARIA, André de Oliveira
Civil Engineer - Pimenta de Ávila

EIRAS, Cahio Guimarães Seabra
Geological Engineer - Pimenta de Ávila

MIRANDA, Tadeu Marçal
Civil Engineer - VALE

MIRANDA, Tamires Souza Morais
Civil Engineer - VALE

ABSTRACT

The Quadrilátero Ferrífero is a geological province characterized by high lithological and structural heterogeneity, with the occurrence of carbonate rocks, particularly dolomites, that are susceptible to chemical dissolution. In tailings dams founded on dolomitic units, the increase in hydraulic gradient may intensify the dissolution process, favoring the development of secondary porosity, hydraulic connectivity, and preferential flow paths. As a consequence, changes may occur in the seepage pattern and in the hydraulic performance of the foundation, with potential implications for the safety and operational reliability of the structure. In this context, this study presents a Trigger Action Response Plan (TARP) for monitoring the possible dissolution of dolomite in the foundation of a tailings dam. The approach integrates triggers associated with hydrogeochemical and piezometric monitoring, which constitute objective lines of evidence for identifying deviations compatible with the intensification of dissolution processes in the foundation. The plan also establishes validation stages, field investigations, and, when necessary, operational interventions. The proposed approach seeks to reduce uncertainties, anticipate precursor signs of karstification, and support operational decision-making based on hydrogeochemical evidence and changes in the flow pattern, considering the spatial and temporal persistence of anomalies.

RESUMO

O Quadrilátero Ferrífero é uma província geológica caracterizada por elevada heterogeneidade litológica e estrutural, com ocorrência de rochas carbonáticas (em especial dolomitos) suscetíveis à dissolução química. Em barragens de rejeitos implantadas sobre unidades dolomíticas, o aumento do gradiente hidráulico pode intensificar o processo de dissolução, favorecendo o aumento da porosidade secundária, da conectividade hidráulica e da formação de fluxos preferenciais. Como consequência, podem ocorrer alterações no padrão de percolação e no desempenho hidráulico da fundação, com potenciais implicações para a segurança e a confiabilidade operacional da estrutura. Nesse contexto, este estudo apresenta um Plano de Ações de Resposta a Gatilhos (TARP) para acompanhamento da possível dissolução do dolomito na fundação de uma barragem de rejeitos. A abordagem integra gatilhos associados ao monitoramento hidrogeoquímico e piezométrico, os quais constituem linhas de evidência objetivas para identificar desvios compatíveis com a intensificação dos processos de dissolução na fundação. O plano também estabelece etapas de validação, investigações de campo e, quando necessário, intervenções operacionais. A proposta busca reduzir incertezas, antecipar sinais precursores de carstificação e apoiar decisões operacionais com base em evidências hidrogeoquímicas e em alterações no padrão de fluxo, considerando a persistência espacial e temporal das anomalias.

1. INTRODUCTION

Carbonate rocks, such as limestones, dolomites, and marbles, occur over extensive areas of the Earth's crust, representing approximately 10% to 15% of the exposed land surface (Ford and Williams [1]). These rocks are of major economic importance because they host large petroleum reserves and aquifers worldwide. However, from a physical and geotechnical perspective, they are notable for their susceptibility to chemical dissolution, a process that promotes the development of secondary porosity and karst features, thereby altering the mechanical and hydraulic behavior of the rock mass.

The susceptibility of carbonate rocks to dissolution by water has been known for centuries, but its geotechnical implications for dam foundations remain an active field of research and of significant practical relevance (Milanović [2], Waltham et al. [3]).

Progressive dissolution may result in the formation of voids and cavities, enlargement of structural discontinuities, increased permeability, and loss of bearing capacity, with consequences ranging from gradual deterioration of hydraulic performance to structural instability (Fell et al. [4]). Historical cases, such as the Mosul Dam in Iraq and several dams in the Mediterranean region and the Balkans, documented the challenges and risks associated with this issue (Milanović [2], Sissakian et al. [5]).

When present in dam foundations, these rocks require special attention due to their solubility in CO_2 enriched water (Dreybrodt [6], White [7]). Under continuous seepage, dissolution processes may occur and generate karst features, such as conduits and cavities. These conditions may compromise stability and seepage control, which are essential requirements for water and tailings containment structures (Waltham et al. [3], Fell et al. [4]).

Another relevant factor is the hydraulic gradient imposed by the reservoir on the dam foundation, which constitutes one of the main mechanisms for accelerating dissolution compared with pre-existing natural conditions. Numerical studies indicate that hydraulic gradients typical of medium and large dams may increase the dissolution rate of carbonate rocks, promoting a progressive increase in permeability over time (Romanov et al. [8]).

In the context of carbonate rocks, these materials are predominantly composed of minerals such as calcite and dolomite. Although the dissolution of dolomite is chemically similar to that of calcite, it has its own kinetics and stoichiometry, which differentiates it from other carbonates and directly influences the rate of evolution of karst processes in foundations (Chou et al. [9]).

In natural environments, the dissolution of carbonate rocks is initially controlled by the interaction between water and dissolved carbon dioxide, resulting in the formation of carbonic acid, as indicated by Equation 1.

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \quad (1)$$

The formation of carbonic acid promotes an increase in the concentration of hydrogen ions (H^+), contributing to a reduction in water pH and, consequently, to a shift in chemical equilibrium toward the dissolution of carbonate phases. This behavior is directly reflected in the saturation index (SI), since waters with higher partial pressure

of carbon dioxide (pCO_2) and lower pH tend to present undersaturated conditions in relation of dolomite, favoring the advancement of the dissolution process. The overall dolomite dissolution reaction can be represented by Equation 2.

$$CaMg(CO_3)_2 + 2\,H_2CO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + Mg^{2+} + 4\,HCO_3^- \quad (2)$$

This reaction results in the release of calcium ions (Ca^{2+}) and magnesium ions (Mg^{2+}) into the aqueous phase, accompanied by an increase in bicarbonate concentration (HCO_3^-), which translates into an increase in the total alkalinity of the water. As dissolution progresses, the consumption of H^+ associated with bicarbonate formation tends to promote a gradual increase in pH, driving the system toward chemical equilibrium.

In this context, the evaluation of pH, alkalinity, and SI is fundamental for verifying the geochemical state of the system: conditions characterized by relatively low pH, increasing alkalinity, and negative SI are typical of environments in which carbonate dissolution is active, whereas SI values close to zero indicate progressive water saturation and a reduction in the dolomite dissolution rate.

Although carbonate dissolution in natural environments is typically mediated by carbonic acid (H_2CO_3), the process may be intensified when strong acids contribute to the system, particularly sulfuric acid (H_2SO_4), which may derive from atmospheric SO_2 deposition and/or sulfide oxidation.

In these cases, the greater availability of H^+ and the influence of SO_4^{2-} on the ionic balance alter the typical signature of the carbonate system, potentially intensifying the release of Ca^{2+} and Mg^{2+}, as well as generating more abrupt hydrogeochemical responses. This is consistent with stoichiometric formulations that consider the simultaneous attack of H_2CO_3 and H_2SO_4 on Ca–Mg carbonate minerals (Han and Liu [10], Larson and Emmons [11]).

The carbonate dissolution rate is also influenced by seasonality, with greater intensity in summer, followed by autumn, spring, and winter. Higher summer temperatures, greater water flow, and higher pCO_2 values, associated with CO_2 decomposition and transport into water, accelerate the dissolution process (Mo et al. [12]), whereas dissolution rates are significantly lower in winter. In addition, dissolution in dolomites is considerably lower than in limestones due to the higher lattice energy and lower solubility of dolomite compared with calcite. Therefore, the development of karsts tends to be faster in calcite-dominated environments than in dolomite-dominated environments (Mo et al. [12]).

The continuous increase in Ca^{2+}, Mg^{2+}, and HCO_3^- concentrations over time reflects the intensification of carbonate dissolution, especially in dolomitic rocks (Feng et al. [13]). In addition, the degree of fracturing, reactive surface area, residence time, and flow conditions also influence the dissolution process. Fractured rocks have a larger exposed mineral surface area, favoring chemical reactions (Ford and Williams [1]).

Given this context, the present study presents a Trigger Action Response Plan (TARP) for monitoring the possible dissolution of dolomite present in the foundation of a tailings dam, based on hydrogeochemical thresholds defined from a review of the technical literature, and on piezometric limits required to verify changes in the groundwater flow.

2. DOLOMITE CHARACTERIZATION

Considering the Quadrilátero Ferrífero (QF) region, particularly the local geological context characterized by the Cercadinho and Fecho do Funil formations, the foundation of the evaluated tailings dam is characterized by the presence of phyllite and predominantly magnesian dolomite.

Based on the direct investigations performed, it was observed that the dolomites of the Fecho do Funil formation did not show evidence of karstification at great depths. The main indications identified were concentrated near the top of rock, at the interface with the dolomite saprolite. This interpretation is supported by the conceptual hydrogeological model developed, which indicated that the main groundwater flow zone occurs in the shallower portions of the carbonate rock mass, where susceptibility to dissolution is greater.

Figure 2.1 indicates a section of a sample recovered from rotary drilling, highlighting the occurrence of dolomite, with pinkish coloration, from a depth of 55 m and with evidence of fracturing. According to the RMR system of Bieniawski [14], the dolomite rock mass was predominantly classified as Classes II, III, and IV, indicating geomechanical conditions ranging from good to poor. This classification reflects the variability of the material, considering aspects such as intact rock strength, degree of fracturing, discontinuity conditions, and the influence of water.

In the dolomite mass, permeability is mainly controlled by secondary porosity, associated with fracturing and the connectivity of discontinuities. Field campaigns indicated high water consumption during the tests.



Figure 2.1 – Sample showing the occurrence of pinkish dolomite from a depth of 55 m.

3. TARP METHODOLOGY

The Trigger Action Response Plan (TARP) was developed based on the definition of thresholds associated with the dissolution of carbonate rocks, with a focus on dolomite. The approach integrated hydrogeochemical monitoring of parameters sensitive to the dissolution process, namely calcium, magnesium, and bicarbonate, with reference values established from a review of the technical literature on karst environments. In addition, groundwater flow monitoring was also considered through thresholds associated with piezometers and water level indicators, as well as validation stages and complementary investigations, both indirect and direct, intended to support possible operational interventions prior to the occurrence of extreme events associated with deterioration of the foundation conditions.

Hydrogeochemical monitoring is a fundamental tool for the early identification of active dissolution processes in the foundation. In dolomitic rocks, this process may generate systematic changes in the composition of percolating water, which can be identified through adequately distributed monitoring points.

Among the most relevant field parameters are pH, electrical conductivity (EC), temperature, redox potential (Eh), and turbidity, which constitute initial indicators of the hydrogeochemical behavior of the system. Rapid increases in EC may indicate intensification of mineral dissolution, whereas reductions in pH may suggest the contribution of more acidic waters. Increases in turbidity may be associated with the transport of fine particles, including internal erosion processes or the mobilization of materials within cavities.

In the laboratory, the assessment of dolomite dissolution should mainly consider the concentrations of Ca^{2+} and Mg^{2+}, total alkalinity, expressed predominantly as HCO_3^-, and the dolomite saturation index (SI_{dol}).

Molar ratios of Ca^{2+}/Mg^{2+} close to 1.0 may indicate that dolomite is the main source of calcium and magnesium ions in the water. Deviations from this ratio may suggest a contribution from calcite, preferential dissolution of other mineral phases, or mixing with waters from different sources. The correlation between increasing alkalinity and increasing Ca^{2+} and Mg^{2+} concentrations reinforces the interpretation of carbonate dissolution, particularly when compatible with the saturation indices calculated for dolomite (Hem [15]).

The definition of thresholds associated with the dissolution process is more robust when based on historical series and hydrogeochemical data obtained prior to dam construction. However, given the absence of such information for the evaluated dam, studies from the technical literature presenting hydrogeochemical concentrations related to dissolution processes in karst environments in different regions of the world were evaluated (Han and Liu [10], Feng et al. [13], Barbieri et al. [16], Boljat et al. [17], Han et al. [18], Mokadem et al. [19], Plan [20], Salles [21], Narany et al. [22], Tran et al. [23]).

Based on the technical evaluation of these studies, boxplots were elaborated for each parameter, including pH, calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), and bicarbonate (HCO_3^-), as presented from Figure 3.1 to Figure 3.4. From this database, a statistical analysis was developed to define hydrogeochemical thresholds aimed at monitoring the

dissolution process of the dolomite rock mass present in the foundation of the evaluated dam.

It should be noted that hydrogeochemical monitoring is part of the dam's operational routine, with quarterly collection of water samples at depth inside Casagrande piezometers installed in the dolomite. The data obtained from these samples characterizes the values referenced as "Local data" from Figure 3.1 to Figure 3.4. In addition, sampling is collected in the reservoir and in the internal drainage outlet, since the distribution of monitoring points allows comparison between the chemical composition of the reservoir water and the water that seeps deep. This enables temporal assessment of the hydrogeochemical parameters associated with water–rock interaction and the hydraulic behavior of the foundation. For methodological purposes in the present paper, data from samples collected inside the Casagrande piezometers, referenced as "Local data", were used.

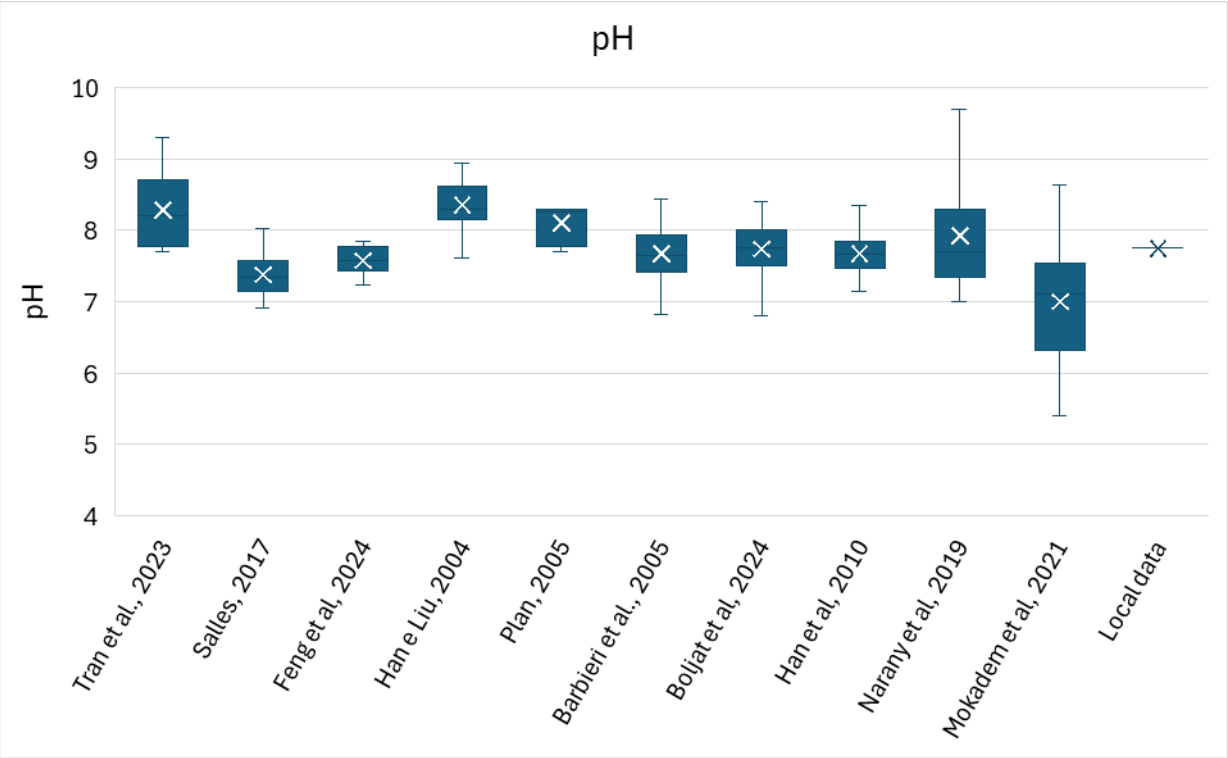


Figure 3.1 – pH distribution in the evaluated studies.

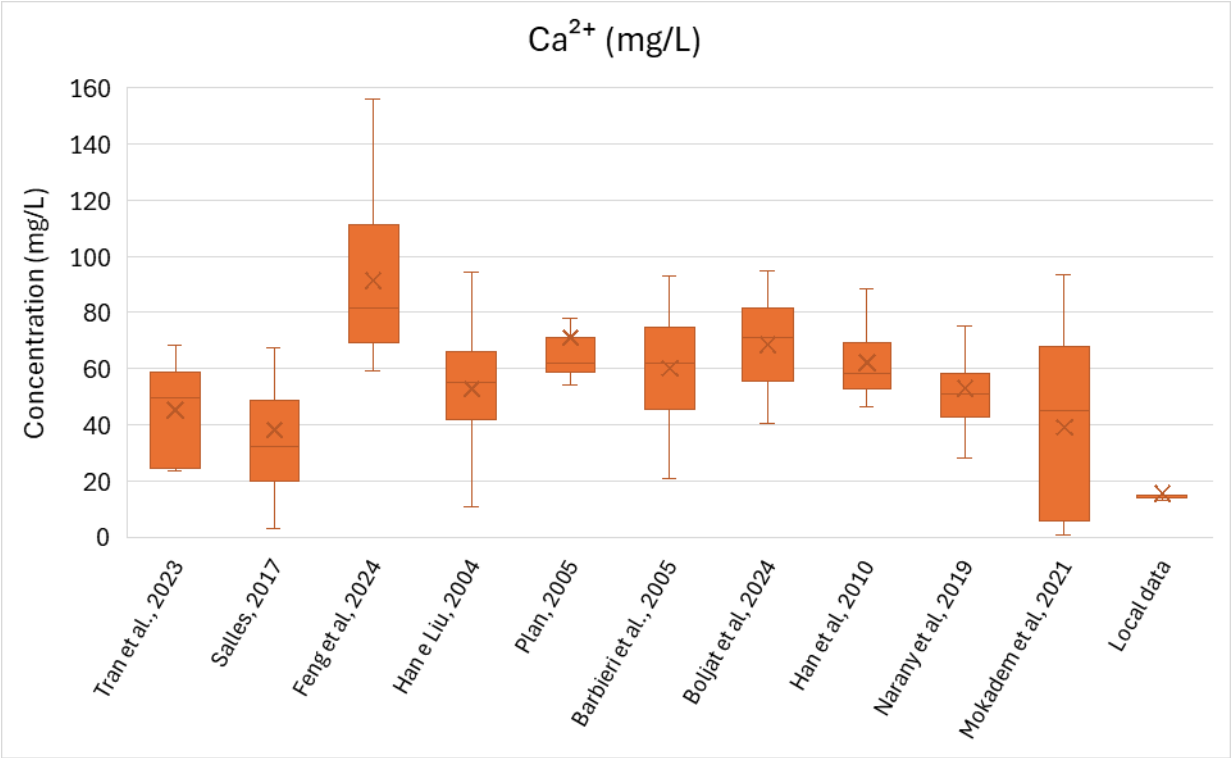


Figure 3.2 – Statistical distribution of Ca^{2+} concentrations (mg/L).

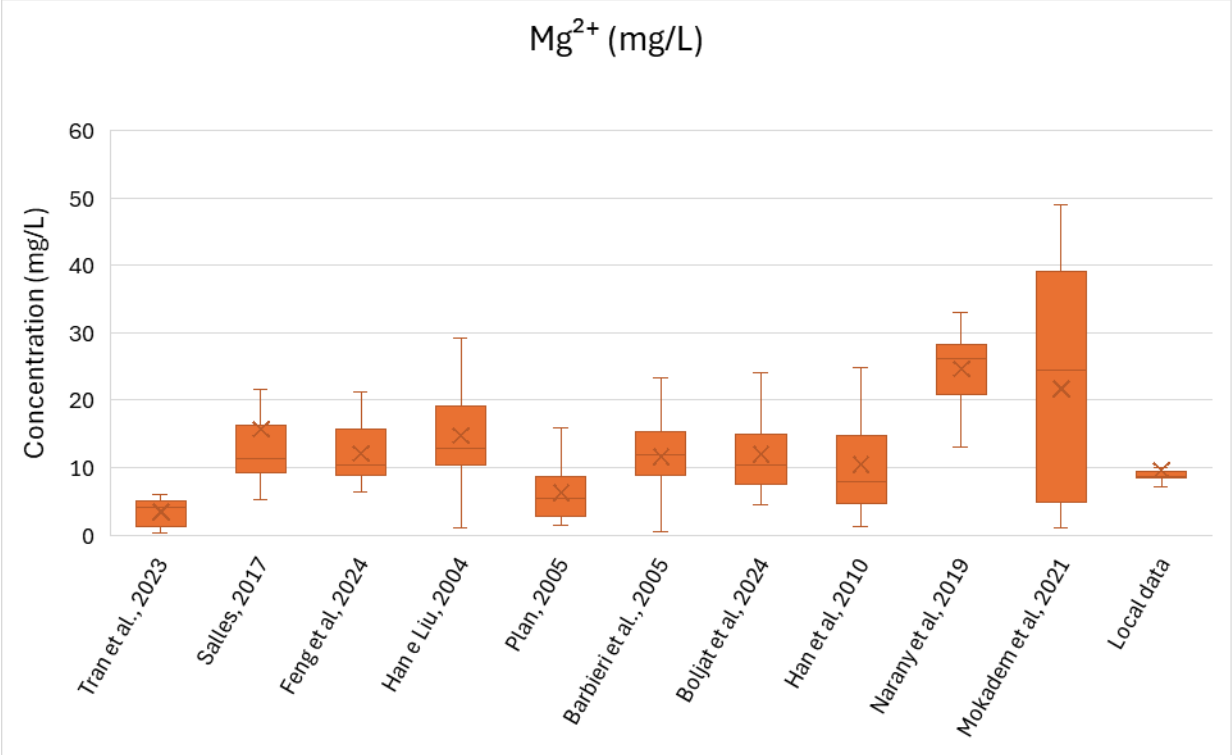


Figure 3.3 – Statistical distribution of Mg^{2+} concentrations (mg/L).

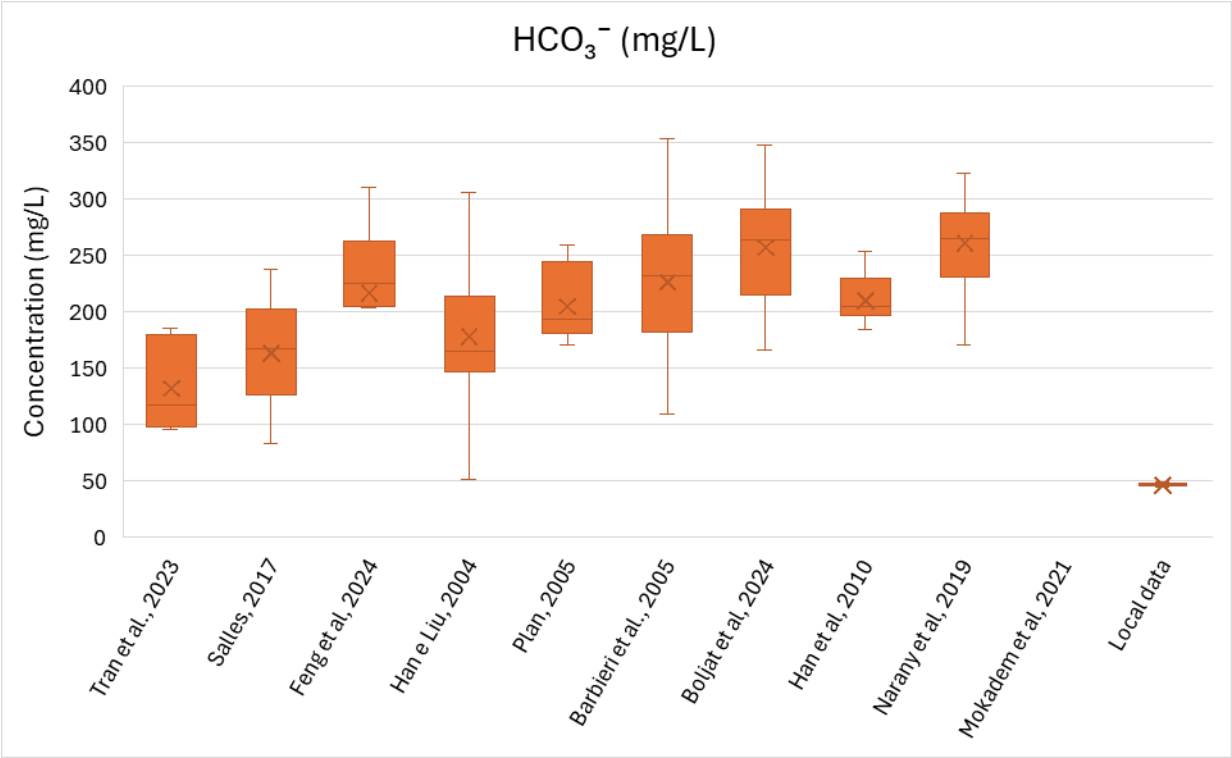


Figure 3.4 – Statistical distribution of HCO_3^- concentrations (mg/L), noting that Mokadem et al. (2021) do not report chemical analysis values for the bicarbonate ion.

As indicated from Figure 3.2 to Figure 3.4, the concentrations of Ca^{2+}, Mg^{2+}, and HCO_3^- in the local water samples, represented by the "Local data" series, are mostly lower than the mean values reported in the other studies, especially for HCO_3^-, which may suggest a low local dissolution rate. Regarding pH (Figure 3.1), the medians are above the neutrality, characterizing slightly alkaline to alkaline waters, with the lowest values reported by Mokadem et al. [19].

4. PROPOSED TARP

The adoption of an integrated monitoring system to identify anomalies and precursor processes of rock mass degradation constitutes a proactive approach, allowing hypotheses to be confirmed through complementary investigations and corrective measures to be assessed before the possible deterioration of foundation conditions.

The TARP approach proposed in this study integrates hydrogeochemical monitoring focused on dissolution indicative parameters, namely calcium, magnesium, and bicarbonate, with groundwater flow monitoring through piezometers and water level indicators. In addition, the plan establishes reference levels, validation procedures, and criteria for triggering complementary investigations, to guide and support the planning of interventions when necessary. Figure 4.1 presents the proposed flowchart, while the guidelines, validation criteria, and actions associated with each stage are detailed in sections 4.1 to 4.4.

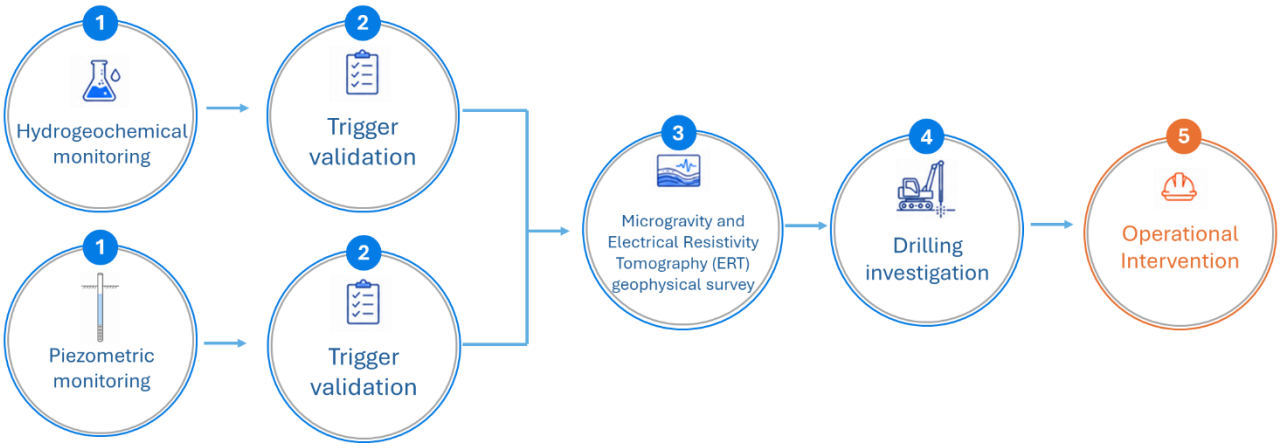


Figure 4.1 – Flowchart for monitoring the dolomite dissolution process.

4.1 Hydrogeochemical Trigger and Validation

Based on the synthesis of the technical literature on karst environments (Section 3), the maximum reference values adopted for the hydrogeochemical triggers were those associated with the third quartile, equivalent to the 75th percentile, of the literature database: Ca^{2+} = 69 mg/L; Mg^{2+} = 19 mg/L; HCO_3^- = 253 mg/L. This criterion represents a statistically robust upper limit, encompassing approximately 75% of the natural variability observed in karst environments and reducing the influence of short-term natural fluctuations on trigger activation.

To ensure geochemical consistency among the parameters, the reference values were adjusted to represent carbonate dissolution processes predominantly associated with dolomite. Thus, the bicarbonate concentration from the reference studies was adopted (HCO_3^- = 253 mg/L), and the calcium and magnesium concentrations were adjusted in accordance with the molar proportion indicated in the dolomite dissolution equation (see Equation 2), resulting in Ca^{2+} = 42 mg/L and Mg^{2+} = 25 mg/L.

These thresholds may represent concentrations associated with more advanced stages of water–rock interaction in karst environments and, when exceeded, may indicate carbonate dissolution processes. For trigger activation purposes, the three parameters must be exceeded simultaneously, avoiding isolated interpretations that may reflect natural variability or local effects unrelated to karstification.

To avoid false alarms, it is suggested that exceedance of the reference values for calcium, magnesium, and bicarbonate be confirmed in three consecutive monitoring campaigns at the same sampling point. If the first campaign shows concentrations above the established values, the next sampling campaign should be conducted one month later. If concentrations remain above the reference values in the second sampling campaign, a third campaign should be conducted after another one-month interval, with the objective of confirming the recurrence and persistence of the hydrogeochemical anomaly.

It is noteworthy mentioning that the interpretation of results must be done in an integrated manner, necessarily considering the behavior of pH and the dolomite saturation index (SI_{dol}). The hydrogeochemical condition for alert characterization corresponds to the association of elevated Ca^{2+}, Mg^{2+}, and HCO_3^- concentrations, as well as a relative decrease in pH, and negative SI_{dol} values, indicating undersaturated

water conditions and a geochemical environment favorable to the continued dissolution of the dolomite rock mass.

If, after repeated sampling campaigns, the parameters remain jointly above the reference values and associated with a pattern of reduced pH and negative SI_{dol}, the geophysical investigation stage should be triggered. Figure 4.2 summarizes the proposed approach.

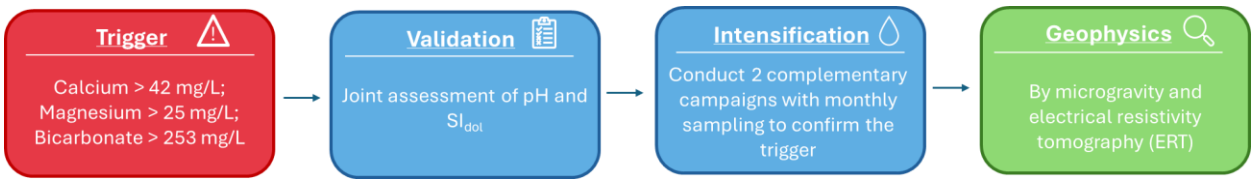


Figure 4.2 - Hydrogeochemical monitoring trigger.

4.2 Piezometric Trigger and Validation

The definition of a representative threshold for anomalous flow, with high sensitivity and a low false-alarm rate, is more accurate when based on the monitoring history and the hydraulic regime of the study area, allowing real variations to be distinguished from inconsistent readings or outliers.

For assessment purposes, the monitoring history of the dam under study and its condition assessment records were considered to determine which variation could represent an operationally safe condition. Thus, a piezometric anomaly was defined as the occurrence of an abrupt variation greater than 2 m between monthly readings, since no records of this magnitude that could indicate an unsafe condition were observed throughout the structure's history, applying the concept of the observational method. If the variation exceeds the 2 m threshold between consecutive monthly readings, the protocol presented in Figure 4.3 is suggested, including event validation, intensification of readings, and triggering of geophysical investigations. The detailed description of the flowchart is presented below.

- Instrumental validation: seeks to eliminate reading errors or failures in the automated acquisition system, applicable to automated water level indicators and automated Casagrande piezometers, through confirmatory manual reading. For manually read instruments, a new confirmatory measurement should be performed;
- Seasonality and historical analysis: assess the correlation between the recorded variation and fluctuations in reservoir level or recent rainfall events, as well as verify whether this variation has previously occurred in the instrument's historical record;
- Comparative spatial analysis: verify the behavior of at least one adjacent piezometer or water level indicator. Generalized responses in multiple instruments tend to indicate the influence of external factors, since the current studies for the evaluated dam did not identify the presence of karst features, whereas concentrated anomalies suggest the occurrence of localized events; and

- Anomaly confirmation: once the validation assumptions have been confirmed, namely consistent reading, absence of correlation with external factors, and localized behavior, monitoring of the instrument is suggested to be intensified to daily readings over 2 weeks. The anomaly is considered confirmed when it presents a persistent or progressive trend, either upward or downward, during this period of 2 weeks. After confirmation, the geophysical campaign should be triggered.

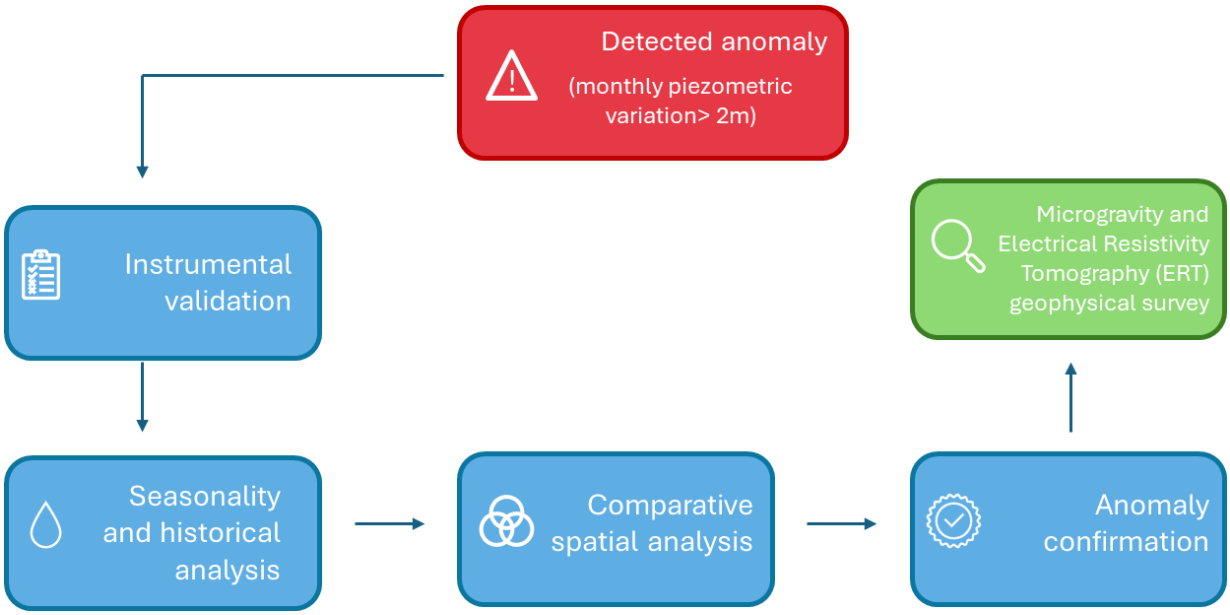


Figure 4.3 - Reading validation protocol for triggering geophysical investigation.

4.3 Geophysics

Geophysical methods are widely used for monitoring and identifying fractured zones and potential cavities in rock masses, as they are non-invasive and allow large subsurface volumes to be investigated. When integrated with hydrogeochemical assessments and evidence of flow alteration, they constitute a complementary tool to validate hypotheses and delineate the anomaly area, guiding and optimizing the execution of direct investigations, which provide localized but highly reliable information on foundation conditions. In addition, periodic geophysical surveys allow temporal monitoring of changes, contributing to the preventive management of risks associated with the evolution of fracturing and the possible formation of conduits.

The choice of the most suitable geophysical method should consider the investigation depth, the type of anomaly or feature to be identified, and the operational limitations of the site (Haeni [24]). In addition, the integration of different geophysical methods tends to increase the reliability of geological and geotechnical characterization.

Among the geophysical methods applied to cavity detection, microgravity and electrical resistivity tomography (ERT) stand out because they are sensitive to physical contrasts associated with the presence of voids, fractured zones, or infilling materials. Microgravity allows the identification of negative anomalies related to reduced subsurface density, whereas ERT contributes to mapping variations in electrical resistivity, which may indicate open cavities, saturated zones, fractured zones, or

zones filled with clayey material. Studies in karst environments indicate that these methods are effective in identifying voids and, when applied in an integrated manner, constitute a robust approach for the detection and characterization of cavities at the surface and at depth (Debeglia et al. [25], Styles et al. [26], Peng et al. [27]).

Thus, geophysical surveys aim to assess the possible presence and evolution of karst features in the foundation, supporting, when necessary, subsequent stages of direct investigation and the definition of corrective and/or preventive measures. The integrated application of microgravity and electrical resistivity tomography (ERT) is recommended, since the technical literature indicates the use of these methods for the investigation of cavities in shallow zones and at greater depths.

In addition, triennial geophysical campaigns are recommended even in the absence of trigger activation, to ensure systematic monitoring of possible changes in the dolomitic foundation.

4.4 Drilling Investigation and Operational Intervention

If geophysical surveys indicate anomalies compatible with cavities or weakened zones in the rock mass, direct investigations through geotechnical drilling are suggested. These investigations aim to confirm the nature, geometry, and extent of the identified features, as well as to validate the geophysical interpretations in the field and allow their geological and geotechnical characterization. When necessary, the investigation can be complemented by borehole camera inspection to increase the reliability of the interpretation.

Once the presence of relevant cavities or karst features is confirmed, mitigation measures compatible with the geometric and geomechanical characteristics of the intercepted structures must be defined. Depending on the observed condition, the feasibility of adopting consolidation treatments or filling of conduits within the rock mass can be assessed, with the objective of reestablishing adequate safety and foundation performance conditions.

5. LIMITATIONS AND UNCERTAINTIES ASSOCIATED WITH THE STUDY

The definition of the Trigger Action Response Plan (TARP) proposed in this study still represents an initial approach in technical literature, due to the complexity of the phenomenon and its evolution, which is generally associated with long-term hydrogeochemical processes.

The database used to establish hydrogeochemical thresholds is related to general karstification contexts and is not specific to dams. Therefore, the proposed thresholds should be interpreted as preliminary technical references, subject to uncertainties and conditioned by the geological, hydrogeological, and operational characteristics of the studies considered.

In addition, the definition of a global piezometric threshold capable of detecting changes in the flow with high sensitivity and accuracy is a complex task. This difficulty

arises from the nature of flow in rock masses, which is influenced by fractures, discontinuities, and heterogeneities within the rock.

6. CONCLUSIONS

This article proposed a Trigger Action Response Plan (TARP) based on monitoring, validation, investigation, and intervention, using a multidisciplinary approach. The triggers were defined based on a review of the technical literature on karstification and considered increases in the concentrations of hydrogeochemical parameters associated with dolomitic dissolution, namely calcium, magnesium, and bicarbonate, as well as anomalous changes in groundwater flow not correlated with external factors or seasonality. For both hydrogeochemical and piezometric triggers, a verification and confirmation methodology was applied and, if the anomaly was confirmed, a geophysical investigation, including microgravity and ERT, was recommended.

Geophysical investigations allow the hypotheses raised through monitoring to be validated. If evidence compatible with conduit formation is identified, direct investigation through drilling is recommended, as well as operational mitigation interventions, where applicable.

It is noteworthy mentioning that this study sought to support risk management, recognizing that the proposed triggers and actions are an initial approach and should be continuously reviewed. In alignment with the Performance-Based concept, the Trigger Action Response Plan (TARP) should be improved as new information is obtained through monitoring, complementary investigations, and assessment of dam performance, becoming progressively more effective in monitoring the possible dissolution process of the dolomite rock mass.

7. KEYWORDS

Tailings dam, foundation, dolomite dissolution, Trigger Action Response Plan (TARP).

8. REFERENCES

[1] FORD, D.; WILLIAMS, P. (2007) – “Karst Hydrogeology and Geomorphology”, John Wiley & Sons, Chichester.

[2] MILANOVIĆ, P. (2004) – “Water Resources Engineering in Karst”, CRC Press, Boca Raton. DOI: 10.1201/9780203499443.

[3] WALTHAM, T.; BELL, F.; CULSHAW, M. (2005) – “Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction”, Springer-Praxis, Berlin.

[4] FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G.; FOSTER, M. (2015) – “Geotechnical Engineering of Dams”, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton. DOI: 10.1201/b17800.

[5] SISSAKIAN, V. K.; AL-ANSARI, N.; ADAMO, N.; LAUE, J.; KNUTSSON, S. (2020) – “The Role of Geological Investigations for Dam Siting: Mosul Dam a Case Study”, Geotechnical and Geological Engineering, v. 38, p. 2085–2096. DOI: 10.1007/s10706-019-01150-2.

[6] DREYBRODT, W. (1988) – “Processes in Karst Systems: Physics, Chemistry, and Geology”, Springer-Verlag.

[7] WHITE, W. B. (1988) – “Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains”, Oxford University Press, Oxford.

[8] ROMANOV, D.; GABROVŠEK, F.; DREYBRODT, W. (2003) – “Dam sites in soluble rocks: a model of increasing leakage by dissolutional widening of fractures beneath a dam”, Engineering Geology, v. 70, n. 1–2, p. 17–35. DOI: 10.1016/S0013-7952(03)00073-5.

[9] CHOU, L.; GARRELS, R. M.; WOLLAST, R. (1989) – “Comparative study of the kinetics and mechanisms of dissolution of carbonate minerals”, Chemical Geology, v. 78, n. 3–4, p. 269–282. DOI: 10.1016/0009-2541(89)90063-6.

[10] HAN, G.; LIU, C.-Q. (2004) – “Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China”, Chemical Geology, v. 204, n. 1–2, p. 1–21. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2003.09.009.

[11] LARSON, E. B.; EMMONS, R. V. (2021) – “Dissolution of carbonate rocks in a laboratory setting: rates and textures”, Minerals, v. 11, n. 6, art. 605. DOI: 10.3390/min11060605.

[12] MO, C.; XIN, S.; HUANG, F.; CAO, J.; XIAO, J. (2023) – “Characteristics of dissolution changes in carbonate rocks and their influencing factors in the Maocun Basin, Guilin, China”, Water, v. 15, n. 18, art. 3285. DOI: 10.3390/w15183285.

[13] FENG, Y.; KANG, F.; GUO, Y.; LI, Z.; LIU, B.; BU, H.; XIA, C.; HE, Q. (2024) – “Evolution of hydrochemistry and water quality of karst groundwater under the effects of intense anthropogenic activities”, Journal of Environmental Management, v. 371, art. 123059. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123059.

[14] BIENIAWSKI, Z. T. (1989) – “Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering”, John Wiley & Sons, New York. ISBN: 978-0-471-60172-2.

[15] HEM, J. D. (1985) – “Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water”, US Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 3rd ed., USGS, Washington. DOI: 10.3133/wsp2254.

[16] BARBIERI, M.; BOSCHETTI, T.; PETITTA, M.; TALLINI, M. (2005) – “Stable isotopes (^{2}H, ^{18}O and $^{87}Sr/^{86}Sr$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy)”, Applied Geochemistry, v. 20, n. 11, p. 2063–2081. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.07.008.

[17] BOLJAT, I.; TERZIĆ, J.; DUIĆ, Ž.; LUKAČ REBERSKI, J.; SELAK, A.; BRIŠKI, M. (2024) – “Tracing hydrological processes: insights from hydrochemical and isotopic investigations in the northern part of Croatian Dinaric karst”, Geologia Croatica, v. 77, n. 2, p. 127–144. DOI: 10.4154/gc.2024.09.

[18] HAN, G.; TANG, Y.; WU, Q. (2010) – “Hydrogeochemistry and dissolved inorganic carbon isotopic composition of karst groundwater in Maolan, southwest China”, Environmental Earth Sciences, v. 60, p. 893–899. DOI: 10.1007/s12665-009-0226-y.

[19] MOKADEM, N.; DENNIS, R.; DENNIS, I. (2021) – “Hydrochemical and stable isotope data of water in karst aquifers during normal flow in South Africa”, Environmental Earth Sciences, v. 80, art. 519. DOI: 10.1007/s12665-021-09845-7.

[20] PLAN, L. (2005) – “Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian Alps”, Geomorphology, v. 68, n. 3–4, p. 201–212. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.11.014.

[21] SALLES, L. Q. (2017) – “Hidrogeologia e risco geológico em rochas carbonáticas proterozoicas: porção central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil”, master’s dissertation, Institute of Geosciences, Federal University of Bahia, Salvador.

[22] NARANY, T. S.; BITTNER, D.; DISSE, M.; CHIOGNA, G. (2019) – “Spatial and temporal variability in hydrochemistry of a small-scale dolomite karst environment”, Environmental Earth Sciences, v. 78, n. 9, art. 273. DOI: 10.1007/s12665-019-8276-2.

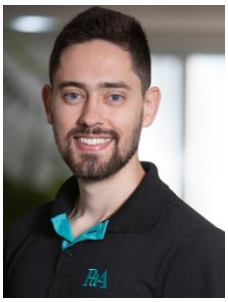
[23] TRAN, D. A.; GOEPPERT, N.; GOLDSCHEIDER, N. (2023) – “Use of major ion chemistry and trace and rare earth elements to characterize hydraulic relations, mixing processes and water–rock interaction in the Dong Van karst aquifer system, Northern Vietnam”, Hydrogeology Journal, v. 31, p. 1735–1753. DOI: 10.1007/s10040-023-02689-4.

[24] HAENI, F. P. (1986) – “Application of seismic refraction methods in groundwater modeling studies in New England”, Geophysics, v. 51, n. 2, p. 236–249. DOI: 10.1190/1.1442083.

[25] DEBEGLIA, N.; BITRI, A.; THIERRY, P. (2006) – “Karst investigations using microgravity and MASW: application to Orléans, France”, Near Surface Geophysics, v. 4, n. 4, p. 215–225. DOI: 10.3997/1873-0604.2005046.

[26] STYLES, P.; MCGRATH, R.; THOMAS, E.; CASSIDY, N. J. (2005) – “The use of microgravity for cavity characterization in karstic terrains”, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, v. 38, n. 2, p. 155–169. DOI: 10.1144/1470-9236/04-035.

[27] PENG, C.; WANG, C.; LI, Z. (2025) – “Review of geophysical data acquisition methods for underground feature detection and future trends”, Tunnelling and Underground Space Technology, art. 106731. DOI: 10.1016/j.tust.2025.106731.

	**BARROS, Henrique Teixeira Godoi de** Civil engineer with an M.Sc. in Civil Engineering from the Federal University of Ouro Preto and a specialization in Geotechnical Engineering from PUC Minas. He works as a geotechnical engineer at Pimenta de Ávila Consulting, as part of the EoR geotechnical team.
	**FARIA, André de Oliveira** Civil Engineer graduated from the Federal University of Ouro Preto in Minas Gerais, Brazil. He also has a Master's in Geotechnics from Federal University of Ouro Preto and he is currently EoR at Pimenta de Ávila Consulting. His areas of expertise/research interest are: dam closure, liquefaction, constitutive modeling and dam monitoring/operation.
	**EIRAS, Cahio Guimarães Seabra** Geological Engineer from UFOP with an MSc in Geotechnics from USP São Carlos. Coordinates Geology, Hydrogeology and Rock Mechanics at Pimenta de Ávila, supporting projects on tailings dams, waste/tailings piles, open-pit stability, 3D geological-geotechnical models, and team leadership. Author of international publications on susceptibility analyses.
	**MIRANDA, Tadeu Marçal** Responsible Tailings Facility Engineer (RTFE) at Vale, graduated in Civil Engineering from the Federal University of Ouro Preto, with a specialization in Project Management and a Master's degree in Geotechnics from UFOP. Experience in geotechnical projects focused on waste rock stacks and dams, dam decharacterization, and monitoring the performance and construction of geotechnical structures.
	**MIRANDA, Tamires Souza Morais** Tamires has been working as a Geotechnical Engineer at Vale in Minas Gerais. She has experience in geotechnical management of different types of dams, and interface with national and international auditors, as well as Engineer of Records. She also supports the implementation of the global standardization TSF processes (GISTM).

BRAZILIAN COMMITTEE ON DAMS
VI SYMPOSIUM ON INSTRUMENTATION OF DAMS AND GEOTECHNICAL STRUCTURES
THEME IN.3, IN.4
BELÉM, PA, BRAZIL – SEPTEMBER 24, 2026

GEOTECHNICAL CONTRACT MANAGEMENT AND ITS EFFECTIVENESS IN THE STEWARDSHIP OF TAILINGS DAM GEOTECHNICAL ASSETS

MOREIRA, Victor de Almeida
Geotechnical Governance Manager - Vale Base Metals

MOURA, Fábio Lucas
Specialist Engineer - Vale Base Metals

AIRES, Vancarlos Ferreira
Engineer - Vale Base Metals

BARBOSA, Felipe
Geotechnical Manager – Vale Base Metals

RODRIGUES, João Paulo
Geotechnical Manager - Vale Base Metals

ABSTRACT

The recent dam failures of Mount Polley (2014), Fundão (2015), and B1/Brumadinho (2019) reshaped global tailings management, prompting expansion of regulatory, technical, and assurance frameworks, most notably the Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM) [1]. Technical literature has advanced in instrumentation, monitoring, and risk analysis; yet a decisive dimension of the geotechnical response chain remains underexamined: the contractual frameworks and architecture that sustain it. Contracts are not merely administrative artifacts but structural mechanisms of risk management. Drawing on contract theory [2], asset management standards (ISO 55000) [3], internationally recognized contracting frameworks (FIDIC Rainbow Suite [4] and AACE Recommended Practices [5][6]), and benchmarking with adjacent infrastructure sectors, this paper identifies six contractual pathologies in mining geotechnical practice — fragmentation, reactive posture, mobilization friction, data–decision disintegration, conflict of interest, and emergency rigidity — and proposes five governing principles: risk-based contracting, governed flexibility, integrated value chains, operational readiness as a contractual obligation, and alignment with the tailings and dam management system. The paper further addresses, as a cross-cutting concern, the readiness of the procurement process itself for emergency contracting, including stakeholder mapping, decision-rights matrices, and pre-authorized procurement pathways. A maturity matrix and a conceptual framework linking risk, contractual structure, and response effectiveness are presented as practical instruments. The central message is that geotechnical risk

management does not end at the sensor or the numerical model; it passes, necessarily, through the contractual structure that sustains the response chain.

RESUMO

As recentes falhas de barragens de Mount Polley (2014), Fundão (2015) e B1/Brumadinho (2019) transformaram a gestão global de rejeitos, impulsionando a expansão de arcabouços regulatórios, técnicos e de asseguração, com destaque para o Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM) [1]. A literatura técnica avançou em instrumentação, monitoramento e análise de riscos; contudo, uma dimensão decisiva da cadeia de resposta geotécnica permanece pouco examinada: os frameworks e a arquitetura contratuais que a sustentam. Contratos não são meros artefatos administrativos, mas mecanismos estruturais de gestão de riscos. Com base na teoria dos contratos [2], em normas de gestão de ativos (ISO 55000) [3], em referenciais contratuais internacionalmente reconhecidos (FIDIC Rainbow Suite [4] e AACE Recommended Practices [5][6]) e em benchmarking com setores de infraestrutura adjacentes, este artigo identifica seis patologias contratuais na prática geotécnica da mineração — fragmentação, postura reativa, fricção de mobilização, desintegração entre dados e decisão, conflito de interesses e rigidez em emergências — e propõe cinco princípios orientadores: contratação baseada em risco, flexibilidade governada, cadeias de valor integradas, prontidão operacional como obrigação contratual e alinhamento com o sistema de gestão de rejeitos e barragens. O artigo também aborda, como tema transversal, a prontidão do próprio processo de suprimentos para contratações em emergência, incluindo mapeamento de stakeholders, matrizes de direitos de decisão e vias de contratação pré-autorizadas. Uma matriz de maturidade e um framework conceitual que conectam risco, estrutura contratual e efetividade de resposta são apresentados como instrumentos práticos. A mensagem central é que a gestão de riscos geotécnicos não termina no sensor ou no modelo numérico; ela necessariamente passa pela estrutura contratual que sustenta a cadeia de resposta.

1. INTRODUCTION

Over the past decade, the social licence to operate of the global mining industry has been substantially influenced by a sequence of major tailings dam failures whose consequences extended beyond the technical domain. Events such as Mount Polley in Canada in 2014, Fundão in Brazil in 2015, Brumadinho in Brazil in 2019, and Jagersfontein in South Africa in 2022 demonstrated that failures involving Tailings Storage Facilities may generate severe human, environmental, social, legal, financial, and reputational consequences, depending on the characteristics of the structure, its consequence classification, the exposed population, and the surrounding environmental and socioeconomic context [7][8]. These events reinforced the understanding that tailings governance is not limited to geotechnical design or operational control, but also depends on the institutional, managerial, and contractual systems that support decision-making and response capability.

The institutional response to these events has been significant. The Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM), launched in 2020 under the joint sponsorship of the International Council on Mining and Metals (ICMM), the United Nations Environment Programme, and the Principles for Responsible Investment, established internationally harmonized expectations for the entire tailings life cycle [1]. From a regional perspective, national regulators, particularly in Brazil through the Brazilian National Mining Agency (ANM), have also advanced toward more prescriptive instruments, expanding requirements related to monitoring, governance, the role of the Engineer of Record, and independent technical review [9]. In parallel, investors, insurers, regulators, and host communities have increased their scrutiny of tailings management practices, reinforcing the position of dam safety as a strategic governance issue.

In this context, technical excellence is necessary but not sufficient. Operators with adequately instrumented structures, rigorous numerical models, and qualified technical teams may still face vulnerabilities if the contractual architecture that sustains monitoring, analysis, maintenance, review, emergency mobilization, and decision support is fragmented, rigid, or poorly aligned with the risk profile of the asset. The effectiveness of geotechnical risk management therefore depends not only on the availability of technical information, but also on the capacity of the organization to transform that information into timely decisions and actions through properly structured contractual arrangements.

This paper takes that observation as its starting point and examines geotechnical contract management as a critical component of tailings dam asset stewardship. It first establishes a theoretical foundation linking asset management, monitoring technology, and engineering contracting models. It then diagnoses recurring contractual pathologies in current mining practice, including fragmentation, reactive posture, mobilization friction, disintegration between data and decision, conflict of interest, and

emergency rigidity. Based on this diagnosis, the paper proposes governing principles and a conceptual framework for improving contractual architecture, with emphasis on risk-based contracting, governed flexibility, integrated service chains, operational readiness, and alignment with the tailings and dam management system. Finally, trade-offs, implementation barriers, a maturity matrix, and emergency procurement readiness are discussed as practical elements to support the evolution of geotechnical contract management in mining..

2. THEORETICAL FUNDATION

The notion that a tailings dam should be managed as an asset with an explicit life cycle is firmly established in literature and normative frameworks. ISO 55000 [3], although developed for general asset management, provides a useful backbone, positioning assets as bearers of value that must be governed coherently from inception through retirement, with explicit linkage to organizational strategy, risk appetite, and stakeholder expectations.

Applied to tailings infrastructure, this means that a dam is not a static engineered object but a dynamic system that traverses distinct phases — design, construction, operation, raisings, closure, and post-closure stewardship — each with its own technical demands, risk profile, and required service portfolio.

Industry frameworks reinforce and refine this view. The International Commission on Large Dams (ICOLD) [10], the Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) [11], and the Canadian Dam Association (CDA) [12] provide guidelines that articulate the obligations of the dam owner along the life cycle, including specific requirements for surveillance, performance review, dam safety review, and emergency preparedness. GISTM [1] goes further, prescribing the existence of an integrated tailings management system anchored in the accountability of senior management and supported by an Independent Tailings Review Board (ITRB) and an Engineer of Record (EoR). The unifying premise of these frameworks is that the management of geotechnical assets requires continuity of capability across decades — and continuity of capability is, in operational terms, continuity of the contractual relationships that deliver it.

Contracts must follow asset life cycles, not annual procurement cycles. A monitoring contract for an active raising phase differs fundamentally from closure stewardship needs. Yet many operators structure portfolios around procurement convenience rather than asset state. Aligning contractual architecture with asset lifecycle is a foundational correction this paper addresses.

2.1 The Geotechnical Monitoring Technology Stack

Modern dam monitoring has evolved into a multi-layered, technology-intensive discipline. Slope stability radar (SSR), interferometric ground-based radar (IBIS), robotic total stations (RTS), high-precision GNSS arrays, automated vibrating-wire piezometers, satellite-based InSAR, distributed fiber-optic sensing, and LiDAR-equipped UAVs together compose a stack capable of providing real-time visibility of structural behavior at multiple spatial and temporal resolutions [13]. The maturity of these technologies, combined with the integration capabilities of modern data

platforms, allows operators to detect sensitive deformations, pore pressure anomalies, and surface displacement patterns that would have been invisible some years ago.

The strategic implication of this technological sophistication is that an instrumentation portfolio must go beyond the sensor itself and translate into a valuable, effective decision-making network (Figure 1). Converting raw data into actionable information requires an analytical pipeline that includes data quality control, trend interpretation, threshold management, anomaly investigation, and integration with the geotechnical model of the structure. Each link in this pipeline is typically delivered through a contractual relationship. It is no longer sufficient to contract a piece of equipment; it is necessary to contract the analytical capability, the maintenance regime, the redundancy of critical channels, and the response capability when an anomaly is detected. Treating the radar contract as if it were a fleet rental contract is, in essence, a category error.



Figure 1 - Geotechnical Monitoring and Decision-Making Pipeline.

2.2 Contracting Models in Engineering

Engineering contracting has historically gravitated toward four broad families of instruments [5][14]:

- Lump-sum or fixed-price contracts, where scope and price are largely defined ex ante; unit-price contracts, where remuneration follows measured quantities;
- Cost-reimbursable or cost-plus contracts, where the contractor is reimbursed for actual costs plus a fee;
- Performance-based contracts, where remuneration is linked to outcomes rather than inputs;
- Alliance and integrated project delivery contracts, where the operator and one or more service providers share risks, rewards, and decision rights through formal governance structures.

Internationally, the FIDIC suite of contracts (Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils), commonly known as the “Rainbow Suite”, has become the de facto reference for risk allocation in engineering and infrastructure contracting [4]. The Red Book (employer-design), the Yellow Book (design-build), the Silver Book (turnkey EPC), and the Green Book (short-form/simplified) embody distinct philosophies of risk distribution between employer and contractor, all anchored in FIDIC's Golden Principles of fair and balanced allocation of risk to the party best able to manage it [15]. AACE International, in turn, has developed an extensive body of Recommended Practices addressing contract risk allocation [5], cost estimate classification for the mining and mineral processing industries [6], and the integration of risk management into the Total Cost Management framework [16]. Together, FIDIC and AACE provide the most consolidated international references on how engineering contracts should be designed to manage risk along the project and asset life cycle.

Adjacent critical-infrastructure sectors offer instructive contrasts. The oil and gas industry, particularly in offshore operations, has long employed integrated service contracts in which a single primary contractor coordinates a wide range of subcontractors under unified performance metrics, allowing the operator to manage one interface rather than dozens. The nuclear sector, where the consequences of failure are categorically unacceptable, has developed contracting arrangements that explicitly embed independence, redundancy, and emergency mobilization clauses, often supported by regulatory requirements that mandate specific contractual structures [17]. The hydropower industry, in turn, has developed mature frameworks for surveillance, dam safety review, and emergency response that translate directly into multi-year service agreements with built-in revision and escalation mechanisms [18].

Conversely, the mining sector remains anchored in rigid models—fixed scopes, unit prices, and short horizons—incompatible with dynamic geotechnical risks. Characteristics like temporal evolution, non-linear consequences, and irreducible uncertainty demand flexible contractual instruments. The persistence of rigid models stems from procurement cultures prioritizing cost predictability and audit traceability over rapid response capability. Recognizing this trade-off is essential for designing superior instruments.

3. ANALYZING CURRENT CHALLENGES IN GEOTECHNICAL CONTRACT MANAGEMENT

Drawing on the theoretical foundations above, this section identifies six recurring pathologies in the contractual architecture supporting geotechnical asset management. These pathologies are not exclusive to any single operator or jurisdiction; they reflect structural features of how the mining industry has historically organized its relationship with technical service providers.

3.1 Contractual Fragmentation

A prominent pathology is the proliferation of independent contracts across the geotechnical service portfolio—separating radar, total stations, piezometers, consultancy, and review boards. This rapidly expands active contractual relationships to dozens. The resulting administrative burden of managing renewals, scope adjustments, invoicing, and audits consumes significant time that technical teams should otherwise dedicate to substantive geotechnical analysis.

Fragmentation creates accountability gaps—"gray zones"—where contractor scopes touch but don't overlap. When anomalies appear, responsibility becomes unclear: who investigates? Well-managed portfolios answer this through clear procedures; less mature ones leave it contested, delaying response.

Concentration of services in a single supplier is not the remedy, as it introduces a different family of problems. When a single provider holds much of the geotechnical portfolio of a site, the operator's leverage during contract renegotiation is materially reduced, the continuity risk associated with provider exit becomes systemic, and potential conflicts of interest emerge when the same provider designs, monitors, and reviews.

The right answer is neither full pulverization nor excessive concentration, but optimized fragmentation — a deliberate distribution of services across providers, calibrated to the risk profile of each structure, the criticality of each service, and the operator's strategic posture toward each provider relationship. Designing this distribution is itself an act of risk management, deserving the same analytical rigor that the operator applies to designing its monitoring plan.

3.2 Functional Chain and the Reactive Cost Trap

A geotechnical contractual portfolio operates in one of two regimes: (i) a functional regime, in which contracts are designed to support planned, predictive, and continuous management of structures; or (ii) a reactive regime, in which contracts are repeatedly mobilized in corrective and emergency mode to address situations that should have been anticipated. The cost differential between these two regimes is significant and cumulative (Figure 2).

In reactive regimes, operators maintain standby portfolios—pre-purchased consultancy, on-call equipment, retained specialists, to compensate for absent predictive systems. Standby contracts pay for mobilization options, not delivered value. When mobilization occurs, prices reflect urgency and discontinuity. Operators ultimately pay for availability rather than output.

In functional regimes, contracts structure around predictable cycles—inspection, monitoring, analysis, review—with surge capacity via escalation clauses rather than ad-hoc mobilization. Cost optimization comes from plannable operations, not lower individual rates. This improves budget predictability, enables operational planning, and frees technical teams for substantive analysis.

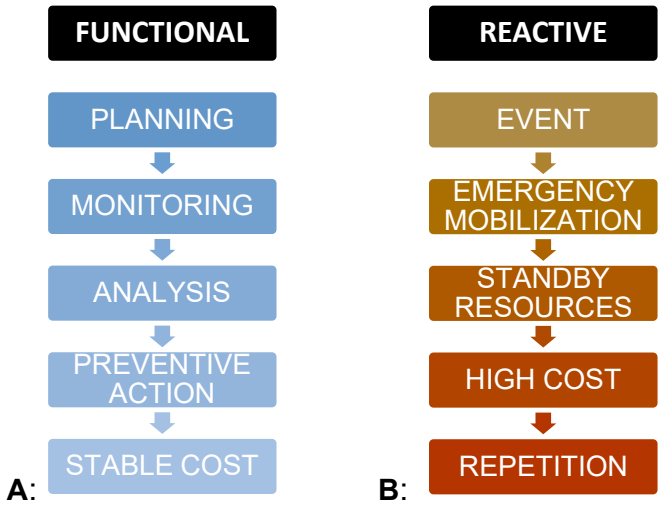


Figure 2 – Functional (**A**) vs Reactive (**B**) Geotechnical Service Delivery Regimes.

3.3 Mobilization and Access Compliance

A consequential pathology concerns the distinction between technical availability and operational readiness. A contractor may be technically available yet unable to access the site because of administrative barriers — expired safety induction, missing occupational health certificates (ASOs in the Brazilian context), lapsed access credentials, incomplete contractor integration, or unresolved contractual amendments.

The result is that resources nominally available are practically inaccessible at the moment when they are most needed.

This pathology is damaging in escalation scenarios where alert-to-arrival time determines consequences. A radar deformation requiring assessment within 12 hours cannot tolerate 48-hour delays from expired contractor credentials. Handling access compliance at mobilization is structurally inadequate; it concentrates administrative burden precisely when rapid action is critical.

The contractual response is to embed operational readiness as a continuous obligation: the contract should require the provider to maintain valid access credentials, current training, and updated documentation throughout the contractual period, with periodic readiness audits and explicit consequences for lapses. This shifts the burden of readiness from the moment of mobilization to the steady state of the contractual relationship, where it can be managed proactively.

3.4 The Disintegration of the Data–Information–Decision Cycle

A critical pathology is the disintegration of the data-to-decision cycle. While modern monitoring generates vast data, it only holds value when transformed into contextualized information and subsequent decisions. In optimized systems, this continuous cycle ensures the organizational response time to an anomaly remains shorter than the structure's failure progression time.

In fragmented portfolios, the data-to-decision cycle is divided among various providers and the operator's internal team, creating data silos. Rigid contracts lacking integration mandates force the operator to act as the sole integration node, often resulting in administrative overload and delayed decisions. Effective management requires contractual portfolios to enforce integration, either by consolidating data processing under a primary provider or by explicitly mandating data fusion and joint interpretation across contracts.

3.5 Independent Reviews and Conflict of Interest

Independent technical reviews — performed by Independent Tailings Review Boards (ITRBs), peer reviewers, dam safety reviewers, or third-line auditors — are at the essence of contemporary tailings governance and a central element of GISTM [1]. Their value derives from independence, both in fact and in perception. When a member of an independent review panel maintains a substantial commercial relationship with the operator or with the designer of the structure under review, the substantive independence of the review is compromised even if its formal independence is preserved.

This is not a hypothetical concern. The pool of senior geotechnical experts with credentials to participate in such reviews is finite, and the same individuals frequently appear in multiple roles across the same operator's portfolio. The contractual instruments that govern these engagements should include explicit conflict-of-interest provisions beyond a generic disclosure clause. Otherwise, the result is a system in which the appearance of independence is maintained while its substance is incrementally eroded.

A robust response requires two elements: formal, binding conflict-of-interest protocols regularly reviewed and enforced; and contractual protection of reviewer independence

from financial or operational interests in review outcomes. These mechanisms are standard in nuclear and aviation sectors and overdue in mining geotechnical contracting.

3.6 Aid Chain and Decision Chain in Emergency Scenarios

Emergency response in geotechnical asset management depends on two complementary mechanisms: the aid chain and the decision chain. The aid chain represents the operational flow through which technical resources are mobilized to investigate, assess, and respond to a geotechnical condition. The decision chain represents the governance structure responsible for reviewing technical information, authorizing actions, and escalating decisions when necessary. Figure 3 illustrates the relationship between these two chains and their role in transforming anomaly detection into a risk-based response.

The aid chain (Figure 3A) begins with surveillance, monitoring, or engineering observations that identify anomalous conditions or potential weaknesses. Once an issue is detected, specialized resources are mobilized through contractual mechanisms to support geotechnical risk assessment. The resulting technical evaluation provides the basis for decision-making and the implementation of appropriate response measures.

The decision chain (Figure 3B) encompasses the individuals and governance bodies responsible for evaluating recommendations and authorizing actions, including the Engineer of Record, Responsible Engineer for the Tailings Facility, Risk Owner, Asset Owner, Crisis Committees, and other stakeholders. Effective emergency management requires both chains to operate in a coordinated manner, ensuring that technical assessments can be converted into timely decisions and actions.

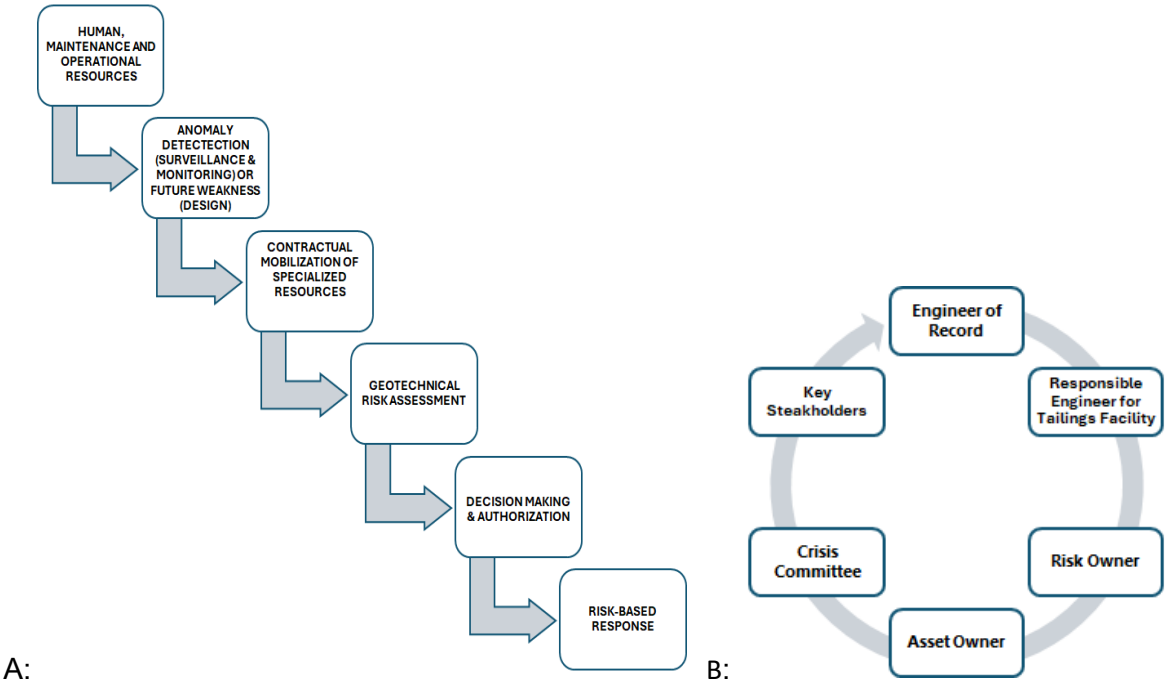


Figure 3 – Aid Chain (A) and Decision Chain (B) in Emergency Scenarios.

4. FIVE GOVERNING PRINCIPLES TOWARD AN EVOLVED PRACTICE

The diagnostic above identifies pathologies but does not, by itself, prescribe a path forward. This section articulates five governing principles that, taken together, define an evolved approach to geotechnical contract management. The principles are not a rigid prescription but a design philosophy that operators can adapt to their portfolio, regulatory environment, and organizational maturity.

4.1 Principle 1: Risk-Based Contracting

The structure, scope, and resource allocation of geotechnical contracts must be proportionate to the risk profile of the underlying assets. Contracts supporting structures with Extreme or Very High consequence classifications under GISTM should not have the same architecture as contracts supporting low-consequence structures, even if the technical activities performed are nominally similar. This principle is consistent with the FIDIC Golden Principle of allocating risk to the party best able to manage it [15], and with AACE Recommended Practice 67R-11 on Contract Risk Allocation [5].

Operationally, this translates to a layered approach where asset criticality dictates the contractual model. High-consequence facilities demand integrated, performance-based contracts ensuring continuity, redundancy, and surge capacity. Conversely, low-consequence structures may rely on standardized, unit-price contracts. Applying uniform templates across disparate risk profiles misallocates resources. The contractual portfolio must deliberately align with the asset base's risk profile, minimizing administrative friction where risk is most concentrated.

4.2 Principle 2: Governed Flexibility

This principle resolves what appears to be a fundamental tension between flexibility and control. Geotechnical risk is, by nature, partially unpredictable; contractual rigidity defeats response capability. But unbounded flexibility erodes financial discipline, operational planning, traceability, and procurement governance. The resolution is governed flexibility: contracts must explicitly accommodate scope variations, but only through pre-defined triggers, criteria, mechanisms, and approval pathways.

Concretely, contracts should include explicit clauses describing the conditions under which scope can be adjusted (technical triggers tied to monitoring outputs or alert levels), the mechanism through which adjustment is requested and authorized, the financial envelope within which adjustment is pre-approved, and the documentation requirements that preserve traceability. This is conceptually aligned with the change management and contingency mechanisms recommended by AACE within the Total Cost Management Framework [16].

4.3 Principle 3: Integrated Service Chains

It is necessary to address the data–information–decision cycle directly. The contractual portfolio must be designed to support the integration of monitoring, analysis, and decision support — either by combining these functions within a single contractual scope, or by mandating explicit interface obligations between fragmented contracts.

Integrated contracts suit large portfolios justifying a primary contractor to manage the entire technology stack and analytical pipeline. Here, operators contract for

"geotechnical awareness" rather than equipment rental. The contractor assumes responsibility for sensor functionality, data transmission, anomaly investigation, and interpreted reporting. This transfers integration risk to the contractor, allowing internal engineering teams to focus on strategic governance rather than administrative tasks.

4.4 Principle 4: Operational Readiness as a Contractual Obligation

Operational readiness must be elevated from an operational matter to a contractual obligation. Compliance with site access requirements, valid safety certifications, current training, and updated contractor integration must be ongoing obligations of the provider, with contractual consequences for lapses.

This requires three mechanisms: explicitly specifying readiness requirements (e.g., reserve equipment, valid certifications); treating readiness as a measurable, compensable deliverable distinct from actual mobilization; and imposing severe penalties for mobilization failures. For instance, failing to deploy a replacement radar within an agreed 24-hour window due to administrative lapses must constitute a material contractual breach.

4.5 Principle 5: Alignment with the Dam Management System

The most encompassing principle is that the contractual portfolio must reflect, reinforce, and operationalize the elements of the dam management system. GISTM, the Operations, Maintenance and Surveillance (OMS) Manual, the Emergency Action Plan (EAP/PAE), and the operator's internal standards collectively define the obligations of the dam owner [1][10][11][12]. The contractual portfolio is the instrument through which those obligations are translated into operational reality. When the management system requires monthly geotechnical inspections, the contract that supports them must require them with the same frequency, scope, and reporting standards. When the management system requires independent review every three years, the contract supporting independent review must align with that cycle and its terms of reference.

This principle has a deeper implication: the contract is a governance instrument. It is the formal mechanism through which the operator communicates its safety standards to its providers and through which providers commit to honoring them. A contractual portfolio misaligned with the management system is, in effect, a management system that does not bind its providers — and a management system that does not bind its providers fails.

5. PROPOSED FRAMEWORK AND DISCUSSION

Comparing the prevailing model (fragmented, reactive, rigid) with the model proposed in this paper (integrated where appropriate, predictive, and risk-calibrated) yields a structured set of trade-offs that operators must navigate consciously rather than by default. At Table 1 is possible to see the synthesizes of this comparison.

Table 1 – Comparative Analysis Between Prevailing and Proposed Geotechnical Contracting Models.

Dimension	Prevailing Model	Proposed Model
Structure	Highly fragmented or fully concentrated, designed seeking low prices.	Optimized fragmentation calibrated to risk.
Flexibility	Rigid scope; scope changes via formal renegotiation.	Governed flexibility through pre-defined triggers.
Pricing logic	Pays for availability; penalties for non-delivery.	Pays for actionable information; SLAs on response time.
Independence	Generic disclosure clauses.	Detailed conflict-of-interest provisions, rotation, exclusion of dual roles.
Emergency response	Ad hoc mobilization; pricing reflects urgency.	Pre-defined activation protocol by alert level.
Procurement readiness	Generic procurement process; black-box pathway.	Mapped stakeholder matrix; pre-authorized instruments.
Alignment with management system	Contracts and management system live in parallel.	Contracts operationalize the management system.

Source: authors' synthesis based on FIDIC [4][15], AACE [5][6][16] and ISO 55000 [3].

5.1 Trade-offs

Three trade-offs deserve explicit acknowledgment. The first is between cost and flexibility. Contracts that incorporate continuous capability, redundancy, and readiness audits have higher steady-state costs than minimalist contracts. Their economic case rests on lower total cost of ownership across the asset life cycle and on the avoidance of catastrophic event costs, but the upfront budgetary impact is real and must be defended internally — a defense that AACE's Total Cost Management framework provides explicit support for [16].

The second trade-off is between concentration and fragmentation. Concentrating services in a primary partner improves coordination but increases dependence; fragmenting them preserves leverage but increases interface risk. The optimized fragmentation principle does not eliminate this trade-off; it requires the operator to navigate it deliberately.

The third trade-off is between control and agility. Governed flexibility achieves both, but only at the cost of a more sophisticated contracting capability. Operators that lack such capability will either revert to rigidity (losing agility) or adopt loose flexibility (losing control).

5.2 Conceptual Framework: Risk, Contractual Structure, and Effectiveness

The conceptual framework that underpins this paper can be summarized in three propositions. First, the geotechnical risk profile of a portfolio determines the technical capability the operator must mobilize. Second, the contractual structure determines the share of that capability that can actually be mobilized in time and with the required

quality. Third, the gap between technical capability mobilized and technical capability required is, in effect, the operator's residual exposure to contractual failure modes.

This framework yields three trajectories. First, when contractual structure is weaker than the risk profile (bottom-right), operations enter a vulnerability zone characterized by systemic fragility and reliance on ad-hoc individual efforts. Second, when contractual structure exceeds the risk profile (top-left), an inefficiency zone emerges, burdening low-risk structures with expensive, inflexible arrangements. The optimal third trajectory is the alignment zone (diagonal), where contractual architecture scales proportionally with risk. Applying the proposed principles (Section 4) achieves this domain of effective stewardship.

5.3 Benchmarking with Adjacent Critical-Infrastructure Sectors

Three sectors offer relevant benchmarks. The offshore oil and gas industry has long employed integrated service contracts in which a primary contractor coordinates a complex web of subcontractors under unified performance metrics, providing the operator with a single accountable interface for technically heterogeneous services. This pattern offers a direct template for integrated geotechnical service chains in operators with the scale to support them. The civil nuclear sector has developed contractual architectures that explicitly embed independence, redundancy, and emergency mobilization, frequently mandated by the regulatory regime [17]; the rigor with which conflict-of-interest provisions are designed and enforced in nuclear contracts offers a concrete reference for the strengthening of independent review provisions in tailings governance. The hydropower sector, with its multi-decade operational horizons and similar dam safety obligations, has developed mature multi-year service agreements with built-in revision and escalation mechanisms that align naturally with the asset life cycle perspective advocated in Section 2 [18].

National contexts also offer instructive contrasts. Canadian dam safety practice [12] has emphasized continuous surveillance and Engineer of Record continuity with implications for contractual horizons. Australian practice, anchored in ANCOLD guidelines [11], has placed strong emphasis on independent review and on the alignment of contracts with the consequence category of structures. Chilean practice, shaped by a uniquely demanding seismic environment, has emphasized real-time monitoring contracts with explicit performance metrics under extreme conditions. Each of these contexts has developed contractual patterns from which the broader industry can learn.

5.4 Contractual Maturity Matrix

The matrix presented in Table 2 allows operators to self-assess the maturity of their geotechnical contract management across five dimensions, each scored from Level 1 (initial) to Level 5 (optimized). The intended use is twofold: as a diagnostic instrument to identify the dimensions in greatest need of evolution, and as a roadmap to define a multi-year evolution path.

Table 2 – Geotechnical Contract Management Maturity Matrix.

Dimension	Level 1 – Initial	Level 2 – Repeatable	Level 3 – Defined	Level 4 – Managed	Level 5 – Optimized
Risk calibration	Single contractual standard for all structures.	Informal differentiation by site.	Formal differentiation by consequence class.	SLAs calibrated to risk.	Continuous adjustment as risk profile evolves.
Flexibility & governance	Rigid scope; renegotiation required.	Ad hoc amendments.	Pre-defined triggers for selected services.	Triggers and approval flows for full portfolio.	Governed flexibility audited and continuously improved.
Service integration	Disconnected contracts; no formal interfaces.	Informal coordination by operator.	Documented interfaces between key contracts.	Interface KPIs tracked and reported.	Integrated value chain with shared accountability.
Operational readiness	Re-established at each mobilization.	Maintained for selected providers.	Contractual obligation with periodic checks.	Audited quarterly with corrective remedies.	Real-time readiness monitoring with provider rating.
Procurement-process readiness	No emergency procurement protocol.	Informal practice in selected cases.	Documented stakeholder matrix and pathways.	Pre-authorized framework agreements; periodic simulations.	Tested protocol with measured time-to-contract.
Alignment with management system	Contracts independent of OMS / EAP.	Loose alignment for selected obligations.	Documented alignment for all critical obligations.	Integrated reviews of contracts and management system.	Contracts as the operational expression of the management system.

Source: authors' synthesis adapted from capability-maturity frameworks [16].

5.5 Emergency Readiness Of The Procurement Process Itself

While previous sections address contractual readiness for emergencies, a preceding vulnerability is the procurement process's ability to swiftly establish or amend contracts. If mobilizing resources takes weeks, contractual elegance becomes irrelevant. Emergency response demands a procurement process engineered for rapid execution, maintaining only the essential governance necessary to prevent fraud and ensure technical competence.

Three elements compose this readiness: (i) a stakeholder and decision-rights matrix that identifies, in advance, who must act at each stage of an emergency procurement; (ii) explicit knowledge of and access to the procurement pathways available within the organization; and (iii) pre-authorized contractual instruments that compress the path from need identification to mobilization.

In a routine procurement cycle, the path from need identification to executed contract typically passes through multiple individuals and approval bodies — technical requisitioner, procurement category manager, legal review, financial controller, governance committee, and final signatory — each acting on its own service-level expectations. The cumulative time to contract may be measured in weeks or months, which is acceptable for planned services but unacceptable for emergencies.

A stakeholder and decision-rights matrix maps, for each emergency scenario, the named decision-makers at each stage, their substitutes, maximum timeframes, and financial authority thresholds. This living document requires updating with organizational changes and testing through periodic tabletop simulations. Table 3 illustrates the structure.

Table 3 – Stakeholder and Decision-Rights Matrix for Emergency Procurement.

Stage	Primary Actor (Named Role)	Backup Actor	Maximum Time / Authority
Need identification & technical justification	Engineer of Record / Site Geotechnical Lead	Corporate Geotechnical Authority	≤ 4 hours
Procurement pathway selection	Emergency Procurement Officer	Category Manager (Geotechnical Services)	≤ 4 hours
Legal/compliance check (sole-source justification, existing framework agreement)	Legal Counsel (Procurement)	Senior Counsel	≤ 6 hours
Financial approval	Operations Director (within Level 2 envelope)	Site Director / CFO (above envelope)	≤ 4 hours; envelope per alert level
Contract execution / mobilization order	Procurement Executive / Site Director	Corporate Crisis Committee	≤ 4 hours

Source: authors' synthesis based on AACE [5][16] and emergency procurement practice in adjacent critical-infrastructure sectors.

Mapping and Knowledge of Procurement Pathways

Most operators have multiple procurement pathways available — competitive tender, sole-source, framework agreements, call-off contracts, emergency purchase orders, and corporate purchase cards for low values. Each pathway has its own legal basis, documentation requirements, approval thresholds, and time-to-contract. In an emergency, choosing the right pathway is itself a decision that must be made quickly and correctly.

Technical teams often lack awareness of alternative procurement pathways, defaulting to standard tendering even when faster, policy-compliant routes exist. Mature systems ensure engineering teams understand available procurement tools through joint

training with supply chain departments, simplified emergency playbooks, and pre-classification of critical services. Ultimately, understanding procurement pathways is as vital to emergency response as knowing the physical evacuation routes.

Pre-Authorized Contractual Instruments

The most effective compression of the procurement cycle is achieved through contractual instruments that pre-authorize emergency mobilizations within defined parameters. Three instruments are particularly effective:

- Framework or umbrella agreements (master service agreements) with pre-qualified providers, which establish in advance the legal terms, rates, and scope envelopes; under these, a call-off can be issued in hours rather than weeks. AACE recognizes such mechanisms as effective tools for managing schedule risk in projects with high uncertainty [5][16].
- Standby retainer contracts with named providers, which secure availability commitments (typically expressed as response-time SLAs) in exchange for a periodic fee, with execution rates pre-agreed.
- Pre-approved emergency purchase envelopes within the operator's procurement policy, which authorize specific roles (e.g., Site Director) to commit funds up to a defined threshold without ex-ante governance review, subject to ex-post reporting and audit. These envelopes are calibrated to the alert levels described in Section 3.6 and Table 4 below.

Table 4 – Alert Levels, Contractual Response, and Decision Authority Framework.

Alert Level	Triggering Condition	Contracted Response	Decision Authority / Envelope
Level 0 – Baseline	Routine surveillance within thresholds.	Continuous monitoring as per base contract; quarterly performance reviews.	Engineer of Record; standard operational budget.
Level 1 – Attention	Threshold crossing or unusual trend in any monitored parameter.	Automatic activation of additional radar passes; intensified piezometer reading; technical note within 24 hours.	EoR with notification to Operations Manager; pre-approved Level 1 envelope.
Level 2 – Alert	Confirmed adverse trend, multiple parameters or critical channel anomaly.	Mobilization of specialized geotechnical consultancy; on-site presence within 12 hours; supplementary instrumentation.	Operations Manager with notification to Site Director; pre-approved Level 2 envelope.
Level 3 – Emergency	EAP activation, imminent failure indicators, or external trigger.	Full mobilization including dam-break verification, drone surveys, third-party reviewer.	Site Director and Corporate Crisis Committee; pre-authorized emergency envelope.

Source: authors' synthesis based on FIDIC [4], AACE [5][16] and dam safety guidelines [10][11][12].

Pre-authorized instruments do not eliminate governance; they relocate it. Ex-ante deliberation is replaced by clear delegation rules and rigorous ex-post review. The trade-off — agility today against scrutiny tomorrow — is precisely the kind of decision that requires explicit board-level endorsement and that the operator's risk and audit committees should review periodically.

5.6 Implementation Barriers

Three barriers complicate implementation. First, organizational silos separate procurement and engineering with divergent incentives, cost versus safety, requiring executive alignment. Second, market maturity varies; advanced models demand sophisticated contractors. In fragmented markets, operators must develop supplier capabilities while managing integration risk. Third, regulatory mandates for direct contracting inadvertently drive fragmentation. Operators must demonstrate that integrated structures with rigorous conflict-of-interest protocols and independent review boards provide superior risk management.

6. CONCLUSIONS

This paper posits that geotechnical risk management extends beyond sensors and models, relying fundamentally on the sustaining contractual structure. Contracts are structural mechanisms dictating the availability, capability, and integration of engineering efforts. Given the catastrophic consequences of tailings dam failures, operators must apply the same rigorous design to their contractual architecture as they do to physical infrastructure.

Current contracting practices frequently misalign with the dynamic nature of geotechnical risk, suffering from fragmentation, reactive postures, and mobilization friction (Section 3). The proposed principles—risk-based contracting, governed flexibility, integrated value chains, operational readiness, and management system alignment—offer a corrective pathway (Section 4). Furthermore, emergency readiness requires a procurement process designed for stress, utilizing pre-authorized pathways and clear decision matrices (Section 6). Adopting these principles allows operators to shift from transactional procurement to strategic capability management, ensuring contractual structures actively support geotechnical asset stewardship.

This reframing demands organizational evolution. Geotechnical engineers must transition from passive consumers of procurement services to active designers of contractual strategy. Simultaneously, procurement professionals must understand the technical risk profiles of supported assets. The most resilient organizations will bridge this gap, deploying multidisciplinary teams to design contracts with the same precision applied to the physical dams.

Evolving geotechnical contract management is a direction, not a destination. Each operator charts its own path, calibrated to asset portfolio, market context, and risk appetite. The principles here provide a compass, not a map. While universally applicable across mining sectors, their implementation adapts to local regulatory frameworks and organizational constraints. The core thesis—that contractual

architecture is inseparable from geotechnical safety—is universal; the path to achieving it is necessarily local.

7. KEYWORDS

Tailings dam safety; geotechnical contract management; GISTM; geotechnical asset management; risk-based contracting; emergency response; second-line governance; mining infrastructure.

8. REFERENCES

[1] GLOBAL TAILINGS REVIEW. (2020) – “Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM)”, joint initiative of ICMM, UNEP and PRI, London.

[2] WILLIAMSON, O. E. (1985) – “The Economic Institutions of Capitalism: Firms, Markets, Relational Contracting”, Free Press, New York.

[3] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2014) – “ISO 55000:2014 – Asset management – Overview, principles and terminology; ISO 55001:2014 – Management systems – Requirements; ISO 55002:2018 – Guidelines for the application of ISO 55001”, ISO, Geneva.

[4] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DES INGÉNIEURS-CONSEILS (FIDIC). (2017) – “Conditions of Contract for Construction (Red Book), Plant and Design-Build (Yellow Book), and EPC/Turnkey Projects (Silver Book) – Second Edition (Rainbow Suite)”, FIDIC, Geneva.

[5] AACE INTERNATIONAL. (latest revision) – “Recommended Practice No. 67R-11 – Contract Risk Allocation – As Applied in Engineering, Procurement, and Construction”, AACE International, Morgantown, WV.

[6] AACE INTERNATIONAL. (latest revision) – “Recommended Practice No. 47R-11 – Cost Estimate Classification System – As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Mining and Mineral Processing Industries”, AACE International, Morgantown, WV.

[7] MORGENSTERN, N. R., VICK, S. G., VAN ZYL, D. (2015) – “Report on Mount Polley Tailings Storage Facility Breach – Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel”, Province of British Columbia, Victoria, Canada.

[8] 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, Brumadinho”, commissioned by Vale S.A., Belo Horizonte, Brazil.

[9] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). (2022) – “Resolução ANM nº 95/2022 – Regulamenta a segurança de barragens de mineração”, ANM, Brasília, Brazil.

[10] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). (2011, 2017, 2020) – “Bulletins on tailings dams: Bulletin 139 – Improving tailings dam safety; Bulletin 153 – Sustainable design and post-closure performance; Bulletin 181 – Sustainable design and post-closure performance of tailings dams”, ICOLD, Paris.

[11] AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS (ANCOLD). (2019) – “Guidelines on Tailings Dams: Planning, Design, Construction, Operation and Closure – Revision 1, Addendum 2019”, ANCOLD, Hobart, Australia.

[12] CANADIAN DAM ASSOCIATION (CDA). (2013, 2014, 2019) – “Dam Safety Guidelines (2013, revised) and Technical Bulletin – Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams”, CDA, Toronto, Canada.

[13] BRITISH COLUMBIA MINISTRY OF ENERGY, MINES AND PETROLEUM RESOURCES. (2019) – “Health, Safety and Reclamation Code for Mines in British Columbia – Part 10 – Tailings Storage Facilities”, Province of British Columbia, Victoria, Canada.

[14] PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI). (2021) – “A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) – Seventh Edition”, PMI, Newtown Square, PA.

[15] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DES INGÉNIEURS-CONSEILS (FIDIC). (2019) – “The FIDIC Golden Principles – Guidance Note GN-001”, FIDIC, Geneva.

[16] AACE INTERNATIONAL. (Hollmann, J. K., ed., 2012, with subsequent revisions) – “Total Cost Management Framework: An Integrated Approach to Portfolio, Program and Project Management – AACE International TCM Framework”, AACE International, Morgantown, WV.

[17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). (2019) – “IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 2 – Leadership and Management for Safety; and SSG-49 – Procurement Engineering and Supply Chain Guidelines in Support of Operation and Maintenance of Nuclear Facilities”, IAEA, Vienna.

[18] INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION (IHA). (2020) – “Hydropower Sustainability Standard – Operating Stage Tools and Guidelines on Asset Management of Hydropower Infrastructure”, IHA, London.

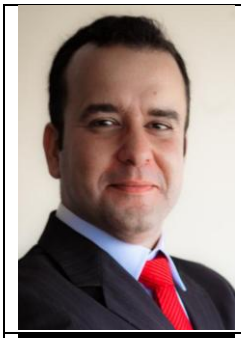
[19] INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (ICMM). (2021) – “Tailings Management: Good Practice Guide – Conformance Protocols for the Global Industry Standard on Tailings Management”, ICMM, London.

[20] SUNCOR ENERGY / CONSTRUCTION INDUSTRY INSTITUTE (CII). (2014) – “Research Team RT-260 – Performance-Based Contracting for Maintenance and Repair Services – Implementation Resource”, CII, Austin, TX.



MOREIRA, Victor de Almeida

Victor Moreira is a Production Engineer with an Executive MBA in Management and Cost Engineering, PMP and CCP certified. He currently serves as Global Manager of Tailings Governance and Risk at Vale Base Metals, with previous experience at Hatch, Vale S.A, MRN, Deloitte and Anglo American.

	**MOURA, Fábio Lucas Carneiro de** Fábio Moura is a Production Engineer with a degree in Computer Science and a postgraduate qualification in Project Management. He currently works with Economic Management (OpEx and CapEx) and Contract Management, supporting geotechnical assets. He has previous experience at Accenture, VLI, and Vale.
	**AIRES, Vancarlos Ferreira** Vancarlos Aires is a Mechanical Engineer with a postgraduate qualification in Project Management. He currently works in Contract Management and provides support to Economic Management (OpEx and CapEx). He has previous experience at Vale S.A., AB InBev, and Concremat.
	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 sServices at Vale Metais Bases.
	**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.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

DIAGNÓSTICO INTEGRADO DE LEITURAS PIEZOMÉTRICAS ANÔMALAS EM INSTRUMENTOS DA FAIXA DE JUSANTE: ESTUDO DE CASO DO DIQUE 14C DA UHE BELO MONTE

João Francisco SILVEIRA
Mestre em Engenharia Civil - SBB Engenharia

Bruno dos Santos da SILVA
Engenheiro Civil - Norte Energia S.A.

Marcus Farias Aires NOBREGA
Engenheiro Civil - Norte Energia S.A.

Leandro Carvalho LIMA
Técnico em Mineração – Norte Energia S.A.

Josielso Balieiro BORGES

Técnico em Mineração – Norte Energia S.A.

RESUMO

O monitoramento por instrumentação geotécnica constitui uma das principais ferramentas para avaliação contínua do comportamento de barragens e diques, permitindo identificar desvios, subsidiar diagnósticos e orientar ações de segurança. Em fevereiro de 2025, seis piezômetros de tubo aberto localizados na faixa de jusante do Dique 14C da UHE Belo Monte apresentaram elevações atípicas de cotas piezométricas, com cinco instrumentos atingindo o nível de atenção e um ultrapassando o nível de alerta. A ocorrência foi registrada no aterro de proteção de talvegue da ombreira esquerda, região hidraulicamente sensível, concebida com dispositivos específicos de drenagem e inserida em contexto geotécnico marcado pela presença histórica de canalículos na fundação. Diante desse cenário, foi conduzido um diagnóstico integrado baseado na avaliação progressiva de hipóteses concorrentes, contemplando a análise das séries históricas dos instrumentos, a avaliação da influência pluviométrica, a verificação do sistema de drenagem da proteção de talvegue, a comparação com instrumentos correlatos e a investigação física no entorno dos piezômetros. Foram avaliadas hipóteses relacionadas à elevação sazonal do lençol freático, à possível obstrução da drenagem local, ao eventual desenvolvimento de processo de percolação interna com potencial erosivo alimentado pela carga hidráulica do reservatório e à perda de integridade dos sistemas de selagem e tubulações-guia. As investigações de campo identificaram condições compatíveis com interferência de águas superficiais ou subsuperficiais rasas nas leituras, incluindo saturação do solo, deficiência de compactação, presença de material inadequado, água junto às tubulações e falhas localizadas em tubulações-guia ou juntas de conexão. As ações corretivas, envolvendo drenagem

local, recomposição dos selos, reparos nas tubulações-guia, compactação em camadas e proteção superficial, resultaram na estabilização das leituras, na redução da influência dos eventos pluviométricos e em maior aderência ao comportamento histórico dos instrumentos. O estudo evidencia a importância do diagnóstico integrado, da verificação física dos instrumentos e da validação pós-intervenção para distinguir respostas localizadas ou instrumentais de condições associadas ao desempenho global de barragens e diques.

ABSTRACT

Geotechnical instrumentation monitoring is one of the main tools for the continuous assessment of dam and dike behavior, enabling the identification of deviations, supporting diagnostic analyses, and guiding dam safety actions. In February 2025, six open standpipe piezometers located in the downstream area of Dike 14C at the Belo Monte Hydropower Plant showed atypical increases in piezometric levels, with five instruments reaching the attention level and one exceeding the alert level. The occurrence was recorded in the thalweg protection fill at the left abutment downstream area, a hydraulically sensitive zone designed with specific drainage features and located in a geotechnical context marked by the historical presence of canaliculi in the foundation. In response to this condition, an integrated diagnostic approach based on the progressive assessment of competing hypotheses was conducted, comprising the analysis of historical instrumentation records, assessment of rainfall influence, verification of the thalweg protection drainage system, comparison with correlated instruments, and physical investigation around the piezometers. The evaluated hypotheses included seasonal groundwater rise, possible obstruction or loss of efficiency of the local drainage system, potential development of an internal seepage process with erosive potential driven by the reservoir hydraulic head, and loss of integrity of the sealing systems and guide pipes. Field investigations identified conditions compatible with the influence of shallow surface or subsurface water on the readings, including soil saturation, compaction deficiencies, unsuitable materials, water around the pipes, and localized failures in guide pipes or connection joints. Corrective actions, including local drainage, seal reconstruction, guide pipe repairs, layer-by-layer compaction, and surface protection, resulted in stabilization of the readings, reduced influence of rainfall events, and greater consistency with the instruments' historical behavior. This case study highlights the importance of integrated diagnosis, physical verification of instruments, and post-intervention validation to distinguish localized or instrument-related responses from conditions associated with the overall performance of dams and dikes.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento por instrumentação de auscultação constitui uma das principais ferramentas para o acompanhamento do desempenho de barragens e diques. Entre os instrumentos empregados, os piezômetros assumem papel relevante na avaliação das condições hidráulicas do maciço, da fundação e dos sistemas de drenagem, permitindo o acompanhamento das cargas hidráulicas e dos níveis piezométricos associados ao comportamento da estrutura. No contexto da segurança de barragens, a ultrapassagem de níveis de controle deve ser interpretada como gatilho para análise técnica, e não como diagnóstico imediato de condição adversa, uma vez que leituras piezométricas anômalas podem decorrer de mecanismos hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos, construtivos ou instrumentais distintos.

A interpretação dessas ocorrências exige uma abordagem integrada e progressiva, capaz de distinguir respostas locais ou instrumentais de comportamentos efetivamente associados ao desempenho global da estrutura. Essa avaliação deve considerar as séries históricas dos instrumentos, o comportamento de instrumentos correlatos, as condições hidrológicas e operacionais, os documentos de projeto e registros “as built”, além de inspeções e investigações de campo. Tal abordagem reduz o risco de conclusões precipitadas e subsidia decisões técnicas proporcionais à condição observada.

Em piezômetros de tubo aberto, essa análise requer atenção adicional à representatividade das leituras. A confiabilidade dos registros depende da adequada comunicação hidráulica com o meio monitorado e da preservação das condições físicas de instalação, incluindo selos, tubulações-guia, compactação do entorno e drenagem superficial. Deficiências nesses elementos podem permitir a interferência de águas superficiais ou subsuperficiais rasas, especialmente em períodos de maior pluviometria, produzindo leituras que não representam integralmente a condição hidráulica do maciço, da fundação ou dos sistemas drenantes monitorados.

A UHE Belo Monte possui sistema estruturado de gestão de segurança de barragens, apoiado em campanhas sistemáticas de auscultação, inspeções visuais, análise crítica dos dados instrumentais e registro das informações em plataforma dedicada de gestão. No Dique 14C, as campanhas de leitura seguem a frequência estabelecida no Manual de Instrumentação, com controle dos equipamentos de medição e análise periódica dos dados pela equipe técnica responsável.

Este artigo apresenta um estudo de caso relacionado à interpretação de leituras piezométricas anômalas em piezômetros de tubo aberto instalados na faixa de jusante do Dique 14C da UHE Belo Monte. A ocorrência foi registrada em região de particular interesse técnico, associada à proteção de talvegue da ombreira esquerda, em contexto geotécnico marcado pela presença histórica de canalículos na fundação e por condições específicas de drenagem local.

Diante desse contexto, o trabalho discute a condução de um diagnóstico integrado baseado na avaliação progressiva de hipóteses concorrentes, envolvendo a análise dos dados instrumentais, a investigação de campo, as intervenções corretivas e a validação posterior das leituras. A abordagem adotada buscou diferenciar respostas localizadas ou instrumentais de condições potencialmente associadas ao desempenho global da estrutura.

O objetivo do trabalho é demonstrar como uma abordagem integrada, progressiva e baseada em evidências contribui para a interpretação de leituras piezométricas anômalas em barragens e diques, especialmente em regiões geotécnica e hidraulicamente sensíveis.

2. CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO E DA ESTRUTURA

A Usina Hidrelétrica Belo Monte está localizada no rio Xingu, no estado do Pará, abrangendo estruturas implantadas nos municípios de Altamira, Vitória do Xingu, Brasil Novo, Anapu e Senador José Porfírio. O arranjo geral do empreendimento é composto pelas usinas Belo Monte e Pimental, pelos canais de derivação e transposição, pelas estruturas de barramento do rio Xingu e pelo conjunto de diques responsáveis pela formação do Reservatório Intermediário, situado na margem esquerda da Volta Grande do Xingu. O Complexo Belo Monte possui potência instalada de 11.233 MW, sendo uma das maiores usinas hidrelétricas do mundo e a maior integralmente instalada em território nacional.

O Reservatório Intermediário é formado pelo fechamento de selas topográficas por meio de diques de contenção, os quais desempenham papel essencial na configuração hidráulica e operacional do empreendimento. Nesse contexto, o Dique 14C constitui uma das estruturas responsáveis pelo fechamento e formação desse reservatório, integrando o conjunto de obras de terra associadas ao sistema de adução da UHE Belo Monte, conforme mostrado na Figura 1.

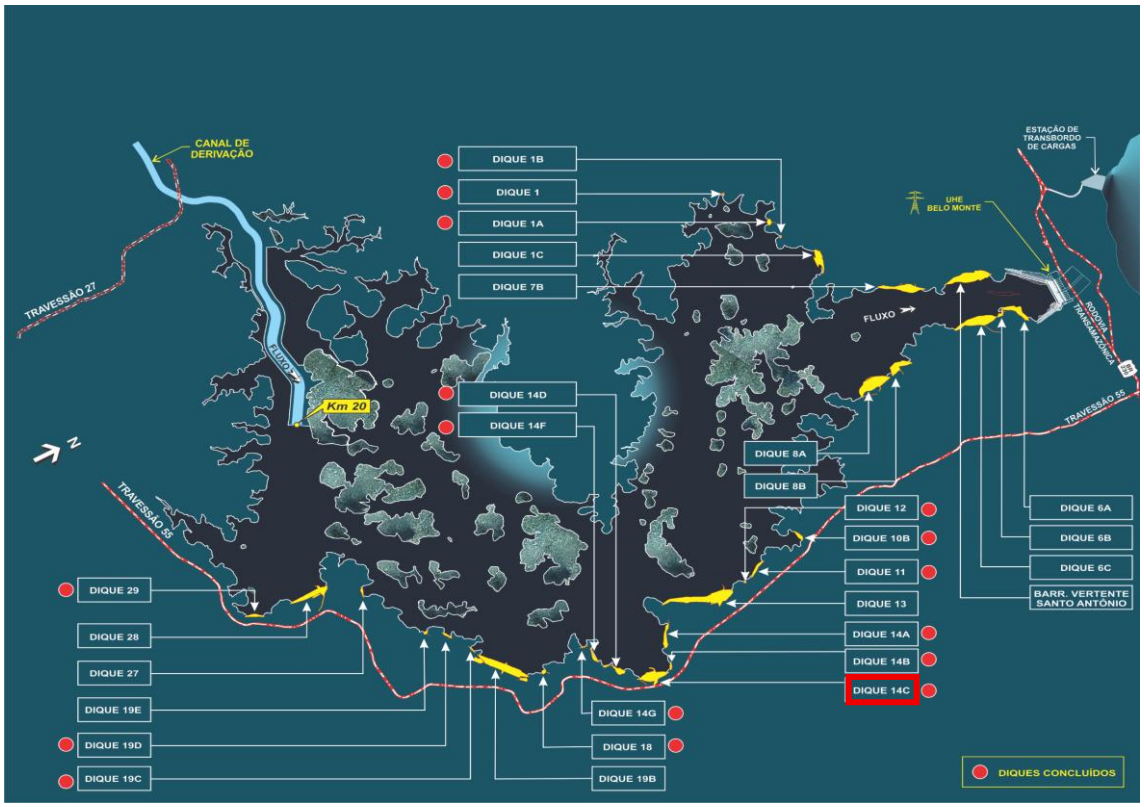


Figura 1 – Arranjo do Reservatório Intermediário.

O Dique 14C possui 53,00 m de altura máxima, 900,00 m de extensão e crista com 7,00 m de largura, coroada na elevação 100,00 m. A estrutura apresenta seção

homogênea em solo compactado, com taludes de montante e jusante conformados por inclinações e bermas intermediárias compatíveis com sua geometria de projeto. O talude de montante apresenta inclinação de 1V:1,8H da crista até a El. 92,50 m, passando a 1V:2H abaixo dessa elevação. O talude de jusante apresenta inclinação de 1V:1,8H até a El. 80,00 m e, abaixo dessa cota, inclinação de 1V:2H, com bermas sucessivas até atingir o dreno de pé em elevação variável, conforme apresentado nas figuras 1 e 2 [1].



Figura 2 – Planta de instrumentação do Dique 14C, com indicação da região dos piezômetros avaliados na faixa de jusante.

O sistema de drenagem interna do Dique 14C é constituído por filtro vertical de areia com 0,70 m de espessura, topo na El. 97,50 m, associado a tapete drenante horizontal no espaldar de jusante, em contato com a fundação. Contempla ainda septos divisores dos tapetes drenantes e dreno de pé com camadas de transição recobertas por enrocamento de proteção, destinados ao controle dos fluxos internos e ao encaminhamento das águas percoladas.

Além dos dispositivos internos de drenagem do dique, a região da ombreira esquerda contempla uma proteção de talvegue a jusante, implantada em área de declividade acentuada e concebida para favorecer o controle de manifestações hídricas locais. Essa proteção é composta por aterro em solo, camada de areia no contato com o terreno natural e dreno francês em material britado, destinado a melhorar as condições de drenagem da região. Esse elemento é particularmente relevante para o presente estudo, uma vez que os piezômetros avaliados estão instalados nessa faixa de jusante, no aterro de proteção do talvegue da ombreira esquerda.

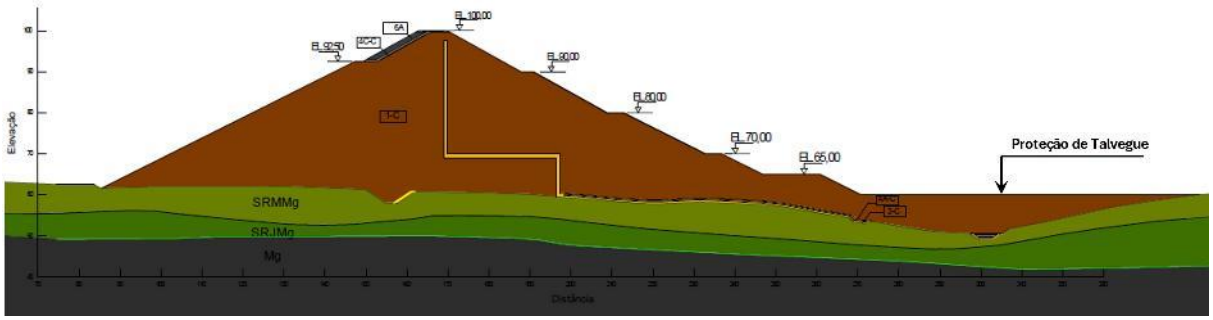


Figura 3 – Seção transversal típica do Dique 14C, com indicação da proteção de talvegue da ombreira esquerda, região onde se localizam os piezômetros avaliados.

Do ponto de vista geológico-geotécnico, o Dique 14C foi assentado em solo residual maduro e solo residual jovem de migmatito, com passagens coluvionares. O solo residual maduro é descrito como silte argilo-arenoso, por vezes areno-argiloso, de coloração marrom a avermelhada, com presença de grãos de quartzo e feldspato alterado. O solo residual jovem é constituído por material silto-argilo-arenoso, variegado, também com grãos de quartzo e feldspato alterado. Durante a fase de construção do empreendimento, no contexto da execução da trincheira de vedação do Dique 14C, foi registrada a presença de canalículos, tendo sido necessário o rebaixamento da trincheira para 6,00 m e a execução de injeção de calda de cimento em trecho específico.

Essas características inserem o Dique 14C em contexto geotécnico típico de solos residuais tropicais, no qual a interpretação do comportamento hidráulico deve considerar a geometria da estrutura, os dispositivos de drenagem, as particularidades da fundação e das ombreiras e as condições locais de drenagem superficial.

3. SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTEXTO DOS PIEZÔMETROS AVALIADOS

O Dique 14C dispõe de um sistema de instrumentação de auscultação distribuído ao longo de sua extensão, concebido para acompanhar o comportamento da estrutura durante a fase de operação. O sistema contempla instrumentos destinados à avaliação das condições hidráulicas, deformacionais e de drenagem, permitindo a análise integrada do desempenho do maciço, da fundação, das ombreiras e dos dispositivos de drenagem interna.

As campanhas de leitura dos instrumentos são realizadas de acordo com a frequência estabelecida no Manual de Instrumentação do Dique 14C [2]. Os equipamentos utilizados nas campanhas, incluindo leitoras, manômetros, trenas e demais dispositivos de medição, são aferidos e calibrados conforme periodicidade estabelecida pelos fabricantes, com registro e controle no sistema corporativo de manutenção. As informações coletadas são armazenadas de forma estruturada e rastreável em plataforma dedicada de gestão de segurança de barragens, apoiando a avaliação dos dados de auscultação e inspeção das estruturas da UHE Belo Monte.

A rotina de acompanhamento inclui análise preliminar semanal dos dados pela equipe de segurança de barragens, com verificação de discrepâncias, desvios em relação ao

comportamento histórico e ultrapassagens dos níveis de controle. Quando identificadas leituras acima desses níveis, a ocorrência é submetida à avaliação técnica específica, podendo envolver análises complementares, inspeções de campo e apoio de consultorias especializadas.

No caso dos piezômetros de tubo aberto, a interpretação das leituras deve considerar a finalidade de cada instrumento, sua posição relativa na seção instrumentada, o meio monitorado e as condições físicas de instalação. A confiabilidade das leituras está associada à adequada comunicação hidráulica com o meio monitorado e à preservação das condições de instalação, incluindo o sistema de selagem, as tubulações-guia e o entorno imediato dos instrumentos. Assim, alterações em leituras piezométricas devem ser avaliadas de forma integrada, considerando tanto o comportamento da estrutura quanto possíveis interferências locais sobre o instrumento.

A ocorrência objeto deste estudo envolveu seis piezômetros de tubo aberto localizados na faixa de jusante do Dique 14C, no aterro de proteção do talvegue da ombreira esquerda: PZA-D14C-06, PZA-D14C-11, PZA-D14C-12, PZA-D14C-15, PZF-D14C-15 e PZF-D14C-29. Os instrumentos da série PZA estão associados ao monitoramento das condições piezométricas no nível do tapete drenante, enquanto os instrumentos da série PZF monitoram as condições piezométricas na fundação.

Tabela 1 – Síntese dos piezômetros avaliados na faixa de jusante do Dique 14C.

Instrumento	Tipo	Meio monitorado	Localização	Condição em fevereiro/2025
PZA-D14C-06	Piezômetro de tubo aberto	Tapete drenante	Faixa de jusante / proteção de talvegue	Nível de atenção
PZA-D14C-11	Piezômetro de tubo aberto	Tapete drenante	Faixa de jusante / proteção de talvegue	Nível de alerta
PZA-D14C-12	Piezômetro de tubo aberto	Tapete drenante	Faixa de jusante / proteção de talvegue	Nível de atenção
PZA-D14C-15	Piezômetro de tubo aberto	Tapete drenante	Faixa de jusante / proteção de talvegue	Nível de atenção
PZF-D14C-15	Piezômetro de tubo aberto	Fundação	Faixa de jusante / proteção de talvegue	Nível de atenção
PZF-D14C-29	Piezômetro de tubo aberto	Fundação	Faixa de jusante / proteção de talvegue	Nível de atenção

Embora possuam funções distintas, os seis instrumentos avaliados apresentam um fator comum relevante: todos estão inseridos em uma mesma região hidráulica e geotécnica, na faixa de jusante do Dique 14C. Essa condição confere particularidade à interpretação das leituras, pois a região está sujeita à influência de condições superficiais e subsuperficiais locais, incluindo variações sazonais de umidade, resposta do lençol freático à pluviometria, eficiência da drenagem superficial e condições físicas de instalação dos instrumentos.

4. OCORRÊNCIA OBSERVADA EM 2025

Durante as campanhas de leitura da instrumentação realizadas em fevereiro de 2025, foram identificadas elevações atípicas nas cotas piezométricas dos seis piezômetros avaliados na faixa de jusante do Dique 14C, a figura 4 apresenta a localização da instalação desses seis instrumentos. As leituras indicaram ultrapassagem dos níveis de controle estabelecidos, sendo que cinco instrumentos atingiram o nível de atenção e o PZA-D14C-11 ultrapassou o nível de alerta.

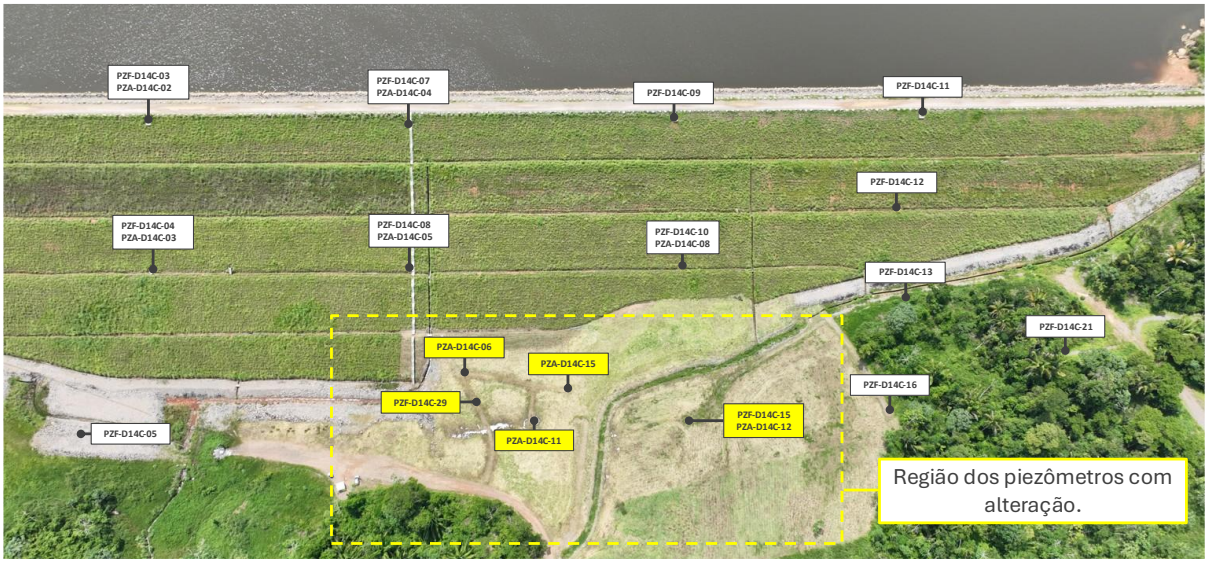


Figura 4 – Localização dos piezômetros com leituras anômalas na faixa de jusante do Dique 14C, no aterro de proteção do talvegue da ombreira esquerda.

A ocorrência chamou atenção por três aspectos principais: a elevação praticamente simultânea das leituras, a magnitude dos picos observados em relação ao comportamento histórico dos instrumentos e a coincidência temporal com o período de maior pluviometria. Embora a faixa de jusante apresente sensibilidade sazonal às chuvas, o comportamento registrado em fevereiro de 2025 destoou do padrão previamente observado nos instrumentos avaliados, indicando a necessidade de investigação técnica mais abrangente.

A interpretação da ocorrência exigiu atenção adicional em razão da sensibilidade hidráulica e geotécnica da região. A proteção de talvegue da ombreira esquerda constitui uma área naturalmente sujeita a manifestações hídricas locais, além de estar associada a dispositivos específicos de drenagem. Soma-se a isso o histórico de canalículos registrados na fundação durante a construção do Dique 14C, condição que justificou cautela na avaliação de hipóteses relacionadas a caminhos preferenciais de percolação ou processos hidráulicos localizados.

A comparação entre as séries de leituras e os dados pluviométricos indicou forte associação temporal entre os eventos de precipitação e as elevações das cotas piezométricas, conforme apresentado na figura 5. Entretanto, essa correlação, embora relevante, não explicava integralmente a magnitude, o caráter súbito e a concentração espacial da resposta observada nos seis instrumentos. Assim, a pluviometria foi considerada elemento fundamental para compreensão da ocorrência, mas não suficiente, isoladamente, para explicar todo o comportamento registrado.

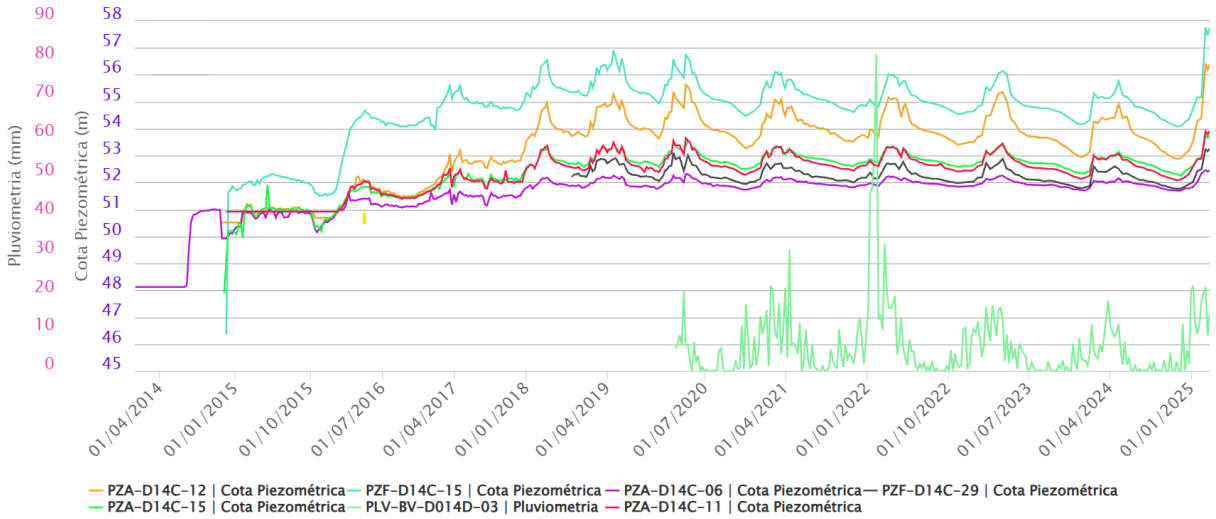


Figura 5 – Histórico das cotas piezométricas dos piezômetros avaliados em comparação com os dados pluviométricos, evidenciando a elevação das leituras durante o período chuvoso de 2025.

Abaixo apresenta-se a Tabela 2 com valores de controle dos piezômetros em análise.

Tabela 2 – Valores de controle.

Piezômetro	Cota Piezométrica (m)	
	Valor de Atenção	Valor de Alerta
PZA-D14C-12	56,40	57,40
PZF-D14C-15	56,75	59,00
PZA-D14C-06	52,32	53,00
PZA-D14C-15	53,56	54,00
PZA-D14C-11	53,65	54,00

Diante desse quadro, a ocorrência exigiu investigação estruturada, capaz de avaliar se o comportamento observado correspondia a uma resposta localizada ou se poderia estar associado a condições mais amplas do desempenho hidráulico da estrutura. Essa necessidade motivou a condução do diagnóstico integrado descrito no item seguinte.

5. METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO

A avaliação da ocorrência foi conduzida por meio de um diagnóstico integrado baseado na avaliação progressiva de hipóteses concorrentes. A equipe técnica não assumiu, de forma imediata, uma causa única para as leituras anômalas, tampouco restringiu a interpretação à resposta sazonal às chuvas ou a uma falha instrumental isolada. A investigação foi estruturada para distinguir hipóteses de natureza hidrogeológica, hidráulica, geotécnica, construtiva e instrumental, considerando diferentes graus de probabilidade e criticidade.

O primeiro passo consistiu na reconstrução do contexto de projeto da região afetada, com análise dos documentos de projeto e registros “as built”. Essa etapa permitiu

compreender a proteção de talvegue como um sistema local composto por talvegue natural, aterro de proteção, camada drenante, dreno francês, fundação, instrumentação e dispositivos associados à drenagem da estrutura, evitando uma interpretação isolada das leituras.

Em seguida, as séries históricas dos instrumentos foram analisadas em conjunto com os dados pluviométricos, de modo a verificar se o padrão registrado em fevereiro de 2025 poderia ser explicado por resposta sazonal ordinária ou se exigia avaliação de hipóteses complementares.

Com base nessa análise inicial, foram formuladas quatro hipóteses principais: elevação sazonal do lençol freático; obstrução ou perda de eficiência da drenagem da proteção de talvegue; eventual processo de percolação interna alimentado pela carga hidráulica do reservatório, com potencial evolução para erosão interna regressiva; e perda de integridade dos selos ou tubulações-guia dos piezômetros, com possibilidade de entrada de águas superficiais pela interface entre o terreno e o sistema de instalação dos instrumentos.

A hipótese de elevação sazonal do lençol freático foi considerada plausível, em razão da sensibilidade da proteção de talvegue à pluviometria. Entretanto, o comportamento histórico indicou que essa hipótese não explicava, isoladamente, a magnitude e o caráter súbito dos picos observados, sendo mantida como fator condicionante, mas não como causa suficiente.

A hipótese de obstrução ou perda de eficiência da drenagem da proteção de talvegue foi avaliada a partir dos documentos de projeto e registros “as built”. A análise indicou que a drenagem local estava interligada à trincheira drenante no offset do dique e direcionada ao medidor de vazão MV-02. O comportamento normal desse medidor não sustentou a hipótese de obstrução ou perda significativa de eficiência do sistema drenante.

A terceira hipótese exigiu abordagem conservadora, em razão de sua maior criticidade potencial. Considerou-se a possibilidade de que as leituras anômalas pudessem estar associadas ao desenvolvimento de um processo de percolação interna alimentado pela carga hidráulica do reservatório, com eventual evolução para erosão interna regressiva pela fundação. Nesse mecanismo, embora o fluxo hidráulico ocorra no sentido montante–jusante, o processo erosivo tende a se iniciar na zona de saída, a jusante, com remoção sucessiva de partículas e avanço regressivo em direção ao reservatório. Embora essa hipótese fosse remota, sua avaliação era necessária diante da presença de canalículos identificados na fundação durante a construção.

Para essa avaliação, foram analisados os instrumentos instalados na projeção do aterro do Dique 14C, incluindo instrumentos no maciço e na fundação. Caso houvesse um processo de percolação interna relevante sob a estrutura, com evolução erosiva associada, seria esperado algum tipo de perturbação ou resposta anômala nesses instrumentos. A normalidade das leituras observadas nessa região, aderentes ao histórico de monitoramento, indicou que não havia evidências de processo erosivo instalado sob a projeção do aterro ou de resposta global associada ao reservatório. Ainda assim, considerando o contexto geotécnico da área, essa hipótese permaneceu sob observação até que os resultados da investigação de campo permitissem consolidar o diagnóstico mais provável.

A quarta hipótese considerou a perda de integridade dos selos ou tubulações-guia dos piezômetros. Essa possibilidade ganhou relevância por três razões principais: a concentração espacial das anomalias nos instrumentos da proteção de talvegue, a forte associação temporal com os eventos de chuva e a experiência acumulada da equipe técnica em ocorrências semelhantes em outras estruturas. Nessa hipótese, a água superficial poderia infiltrar-se pela interface entre o solo e a tubulação-guia, por falhas de compactação no entorno, perda de estanqueidade do selo, avarias na tubulação-guia ou falhas em juntas de conexão. Como consequência, os instrumentos poderiam registrar leituras influenciadas por água externa, não representativas da condição hidráulica real do meio monitorado.

Diferentemente das hipóteses anteriores, essa quarta hipótese não poderia ser confirmada apenas por análise documental ou interpretação de séries instrumentais. Sua verificação exigia inspeção direta do entorno dos instrumentos, com escavações controladas, avaliação da compactação, verificação da presença de água no pé das tubulações, identificação de materiais inadequados, inspeção das tubulações-guia e análise das condições de drenagem superficial. Por esse motivo, foi definida uma campanha específica de investigação da integridade dos selos dos seis piezômetros.

A lógica adotada não se baseou na escolha imediata da hipótese mais simples, mas na avaliação progressiva de cenários com diferentes graus de probabilidade e criticidade. A equipe considerou desde uma resposta sazonal do lençol freático até hipóteses de maior severidade potencial, como obstrução da drenagem da proteção de talvegue e eventual desenvolvimento de processo de percolação interna com evolução erosiva alimentado pela carga hidráulica do reservatório, conforme mostra o quadro 1. Somente após esse processo de qualificação das evidências é que a investigação física dos selos e tubulações-guia foi definida como caminho mais adequado para confirmação do diagnóstico.

Quadro 1 – Hipóteses avaliadas no processo de diagnóstico da ocorrência.

Hipótese avaliada	Fundamentação técnica	Verificações realizadas	Interpretação obtida
Elevação sazonal do lençol freático	Período chuvoso e sensibilidade da faixa de jusante à pluviometria	Análise das séries históricas e comparação com eventos de precipitação	Fator contribuinte, mas insuficiente para explicar isoladamente a magnitude e o caráter súbito dos picos
Obstrução ou perda de eficiência da drenagem da proteção de talvegue	Existência de dreno francês e sistema drenante concebido para a região	Análise de projeto/as built e verificação do comportamento do MV-02	Hipótese não sustentada pelo comportamento normal do medidor de vazão associado ao sistema
Processo de percolação interna alimentado pela carga hidráulica do reservatório, com eventual erosão interna regressiva	Presença histórica de canalículos e criticidade potencial de caminhos preferenciais na fundação	Avaliação dos instrumentos instalados na projeção do aterro, no maciço e na fundação	Considerada remota diante da normalidade dos instrumentos, porém mantida sob observação até consolidação do diagnóstico

Perda de integridade dos selos ou tubulações-guia dos piezômetros	Concentração espacial das anomalias, associação com chuvas e experiência prévia em ocorrências similares	Investigação física no entorno dos seis piezômetros	Hipótese confirmada pelos achados de campo e validada pela estabilização das leituras após as intervenções

A avaliação progressiva das hipóteses orientou a definição da campanha de campo, voltada à verificação direta das condições físicas de instalação dos piezômetros e à confirmação da hipótese de perda de representatividade das leituras.

6. INVESTIGAÇÃO DE CAMPO E AÇÕES CORRETIVAS

A partir do diagnóstico integrado, foi definida campanha de investigação de campo nos seis piezômetros com leituras anômalas, com o objetivo de verificar diretamente as condições físicas de instalação dos instrumentos, especialmente a integridade dos sistemas de selagem, das tubulações-guia e da drenagem superficial no entorno.

As atividades envolveram inspeção visual inicial, drenagem e remoção de materiais inadequados, escavação controlada, verificação do sistema de selagem, correção dos elementos comprometidos e proteção/readequação da drenagem superficial. Foram identificadas condições recorrentes de acúmulo de água, deficiência de drenagem superficial, saturação do solo, compactação inadequada, materiais inadequados e falhas localizadas em tubulações-guia ou juntas de conexão.

Na sequência, foram realizadas ações de drenagem local e remoção de materiais que pudessem comprometer a avaliação direta dos sistemas de selagem. A abertura de cavas no entorno dos piezômetros teve por finalidade reduzir a saturação superficial, melhorar as condições de acesso e permitir a continuidade da investigação em ambiente mais adequado à inspeção dos elementos enterrados. Também foram removidos solos soltos, materiais saturados, material orgânico e camadas superficiais inadequadas.

Após a preparação das áreas, foram executadas escavações controladas no entorno dos instrumentos, constituindo a principal etapa de verificação física da hipótese investigada. As escavações evidenciaram, em diferentes pontos, compactação inadequada nas camadas superficiais, presença de solo saturado, ocorrência de água junto ao pé das tubulações ou manilhas, materiais inadequados e interferências construtivas no entorno dos piezômetros. Também foram identificadas falhas localizadas em tubulações-guia ou juntas de conexão, condição que poderia favorecer a entrada de água externa no sistema de instrumentação. A figura 6 evidencia as falhas executivas [3][4].



Figura 6 – Evidências de campo identificadas na investigação dos piezômetros: (a) empoçamento de água no entorno; (b) drenagem superficial deficiente; (c) presença de material orgânico/inadequado; (d) deficiência de compactação; (e) solo saturado; (f) necessidade de remoção de material solto e saturado; (g) tubulação-guia avariada/falha de vedação; (h) existência de camada competente e sem saturação.

Os principais achados de campo foram organizados em padrões recorrentes, conforme apresentado no quadro 2, de modo a relacionar as evidências observadas às possíveis implicações para a representatividade das leituras piezométricas.

Quadro 2 – Padrões de achados de campo identificados na investigação dos piezômetros.

Padrão observado	**Evidência de campo**	**Implicação para a leitura piezométrica**
Deficiência de drenagem superficial	Acúmulo de água no entorno dos instrumentos e saturação superficial	Aumento da possibilidade de infiltração de água superficial junto aos piezômetros
Compactação inadequada do entorno	Camadas superficiais com baixa compacidade e presença de vazios	Formação de caminhos preferenciais de percolação no entorno do instrumento
Presença de material orgânico	Material orgânico no entorno das tubulações	Redução da qualidade do confinamento e da estanqueidade do sistema de selagem
Água no pé dos instrumentos	Ocorrência de água junto às manilhas/tubulações durante as escavações	Indício de saturação local e interferência externa nas leituras
Falhas em tubulações-guia ou juntas	Danos localizados ou ausência de vedação adequada em conexões	Possibilidade de entrada direta de água externa no sistema de instrumentação
Necessidade de recomposição em solo competente	Identificação de camada com melhores características geotécnicas em profundidade	Orientação da escavação e recomposição do selo a partir de base mais adequada
Drenagem/proteção superficial insuficiente	Escoamento superficial direcionado para áreas próximas aos instrumentos	Maior risco de recorrência da saturação local se não houver readequação superficial

Os achados de campo forneceram evidências compatíveis com a hipótese de perda de representatividade das leituras, associada à interferência de água superficial ou subsuperficial rasa no entorno dos instrumentos. A identificação de materiais inadequados, saturação local, compactação deficiente e falhas em tubulações-guia ou conexões indicou a necessidade de recomposição dos selos a partir de camadas com melhores características geotécnicas, em alguns casos atingidas a aproximadamente 2,0 m de profundidade.

A partir do diagnóstico de campo, foram executadas as ações corretivas necessárias à recomposição dos sistemas de selagem, conforme apresentado na figura 7. Inicialmente, procedeu-se à remoção completa dos materiais inadequados identificados durante as escavações, incluindo solos sem compactação adequada, material orgânico, materiais saturados e interferências construtivas. Nos instrumentos em que foram identificados danos ou falhas em tubulações-guia e juntas de conexão, foram realizados reparos ou substituições dos trechos comprometidos, de modo a restabelecer a integridade física do sistema.

A recomposição do solo no entorno dos piezômetros foi executada em camadas sucessivas, com espessura aproximada de 20 cm, submetidas a controle de compactação utilizando-se compactador manual de solo (tipo sapo). Entre as camadas, foram adotados procedimentos de escarificação para promover adequada aderência entre os materiais recompostos e reduzir a formação de descontinuidades preferenciais para infiltração. Esse procedimento teve como finalidade eliminar vazios, restabelecer o confinamento adequado do entorno dos instrumentos e recompor a estanqueidade do sistema de selagem.



Figura 7 – Etapas de recomposição do selo e proteção superficial dos piezômetros: (a) reparo da tubulação-guia; (b) lançamento de material; (c) compactação controlada; (d) controle da espessura da camada; (e) escarificação entre camadas; (f) conformação elevada para evitar empoçamento; (g) reinstalação da proteção; (h) aplicação de material pétreo e drenagem final.

Como etapa final, foram executadas medidas de proteção superficial e melhoria da drenagem no entorno dos instrumentos. O terreno foi conformado em geometria elevada com o objetivo de direcionar o escoamento das águas pluviais para áreas adjacentes e afastar o fluxo superficial da região dos piezômetros. Também foram implantadas proteções físicas, como manilhas no entorno dos instrumentos, além de camada de proteção com material granular e drenagem periférica, buscando reduzir a possibilidade de acúmulo de água, saturação local e reincidência das interferências

observadas. A figura 7 apresenta as etapas de recomposição do selo e proteção superficial dos drenos [3][4].

As ações executadas concluíram a etapa de recomposição física dos instrumentos e estabeleceram as condições para avaliação do comportamento das leituras no período pós-intervenção, apresentada no item seguinte.

7. RESULTADOS E VALIDAÇÃO DO DIAGNÓSTICO

Antes das intervenções, os seis piezômetros apresentavam elevações significativas das cotas piezométricas, com respostas acentuadas, praticamente simultâneas e temporalmente associadas aos eventos de chuva, sugerindo influência de águas superficiais ou subsuperficiais rasas no entorno dos instrumentos. Após as intervenções, os instrumentos permaneceram abaixo dos níveis de controle durante o período monitorado, mesmo sob novos eventos pluviométricos, conforme apresentado na figura 8.

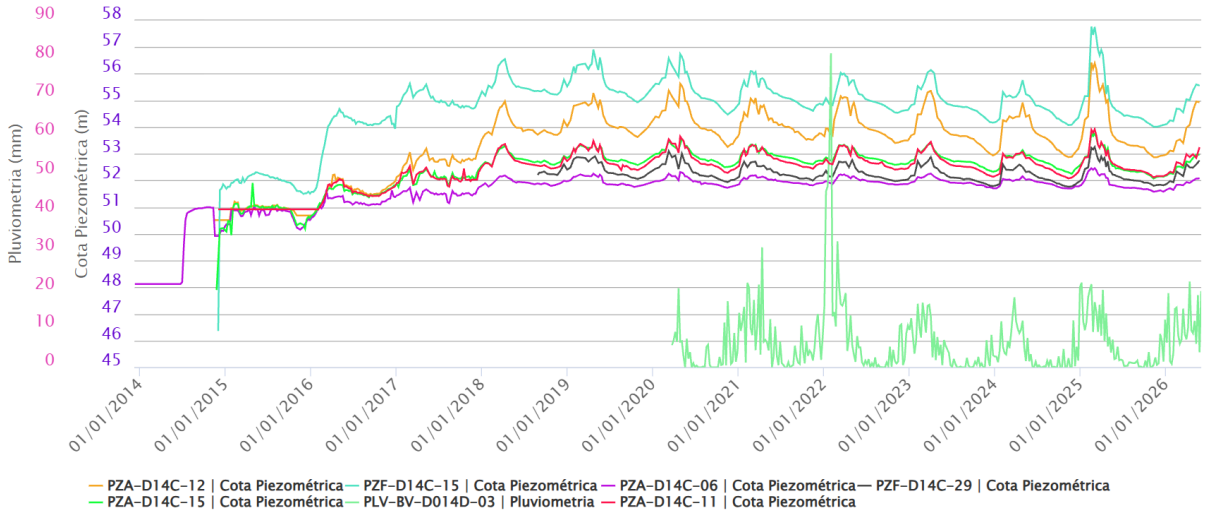


Figura 8 – Evolução das cotas piezométricas dos instrumentos avaliados após as intervenções, em comparação com os dados pluviométricos, evidenciando a estabilização das leituras e a redução da influência de eventos de precipitação.

A comparação entre os períodos pré e pós-intervenção constituiu a principal evidência de validação do diagnóstico. A estabilização das leituras após a remoção dos materiais inadequados, a recomposição compactada do entorno, o reparo ou substituição de trechos comprometidos das tubulações-guia e a implantação de medidas de proteção superficial sustentou a interpretação de que as anomalias estavam associadas predominantemente a fatores localizados no sistema de instalação dos instrumentos.

Adicionalmente, após a execução das intervenções, a área foi inspecionada pela SBB Engenharia, consultoria especializada responsável pelo acompanhamento técnico da instrumentação da UHE Belo Monte [5]. Na ocasião, foram apresentados os achados de campo, as ações corretivas executadas e o comportamento posterior das leituras. A avaliação técnica registrou a adequação da metodologia adotada e a coerência

entre o diagnóstico, as intervenções realizadas e os resultados observados, constituindo evidência complementar ao acompanhamento instrumental pós-intervenção.

A validação pós-intervenção também contribuiu para reduzir a probabilidade das hipóteses de maior criticidade inicialmente avaliadas. Caso as leituras anômalas estivessem associadas à obstrução significativa da drenagem da proteção de talvegue ou ao desenvolvimento de processo de percolação interna com evolução erosiva alimentado pela carga hidráulica do reservatório, seria esperado que a recomposição dos selos e a melhoria da proteção superficial dos instrumentos não fossem suficientes para estabilizar de forma consistente as leituras.

Os resultados obtidos demonstraram coerência entre as hipóteses avaliadas, os achados de campo, a avaliação técnica especializada e o comportamento pós-intervenção. Esse conjunto de evidências reforçou a predominância de fatores localizados no entorno dos piezômetros, sem indicação de alteração global do desempenho hidráulico ou estrutural do Dique 14C.

8. DISCUSSÃO TÉCNICA

A ocorrência registrada nos piezômetros da faixa de jusante do Dique 14C evidencia que a ultrapassagem de níveis de controle em instrumentos de auscultação deve ser interpretada como gatilho para investigação técnica estruturada, e não como diagnóstico imediato de comprometimento da estrutura. No caso analisado, a elevação praticamente simultânea das leituras em seis piezômetros exigiu a condução de um diagnóstico integrado baseado na avaliação progressiva de hipóteses concorrentes, evitando tanto a simplificação excessiva da ocorrência quanto a adoção prematura de uma hipótese crítica sem suporte nas evidências disponíveis.

A principal contribuição técnica do caso está na forma como a investigação foi conduzida. A equipe não restringiu a interpretação à resposta sazonal às chuvas, nem assumiu diretamente uma falha nos selos ou tubulações-guia dos instrumentos, embora essa possibilidade fosse compatível com a associação temporal das leituras com os eventos pluviométricos. Antes da confirmação em campo, foram consideradas hipóteses de diferentes naturezas e criticidades, incluindo condicionantes hidrogeológicos, funcionamento dos dispositivos drenantes, eventual processo de percolação interna e condições físicas de instalação dos instrumentos. Essa abordagem permitiu distinguir uma resposta localizada ou instrumental de condições que poderiam indicar alteração no comportamento global da estrutura.

A localização dos instrumentos teve papel central na estratégia de diagnóstico. Os seis piezômetros estavam inseridos na proteção de talvegue da ombreira esquerda, região cuja concepção de projeto reconhece maior sensibilidade hidrogeológica e maior propensão à ocorrência de manifestações hídricas locais. Assim, a anomalia não poderia ser avaliada apenas como desvio pontual de leitura, mas precisava ser interpretada considerando a interação entre aterro de proteção, camada drenante, dreno francês, fundação, instrumentação e regime pluviométrico.

Outro elemento relevante foi o histórico de canalículos na fundação do Dique 14C, identificado durante a fase de construção. A presença dessas feições justificou

postura conservadora na avaliação de hipóteses de maior criticidade potencial, especialmente aquelas relacionadas a caminhos preferenciais de percolação e eventual evolução para erosão interna regressiva. Nesse tipo de mecanismo, a remoção de partículas tende a se iniciar na zona de saída, a jusante, evoluindo progressivamente em direção ao reservatório. Essa distinção foi importante para orientar a análise dos instrumentos instalados na projeção do aterro, no maciço e na fundação, os quais não indicaram perturbações compatíveis com processo erosivo instalado sob a estrutura.

A confirmação da perda de integridade dos selos e de falhas localizadas nas tubulações-guia evidenciou a importância da condição física dos instrumentos para a confiabilidade do sistema de auscultação. As escavações controladas indicaram que os piezômetros estavam sujeitos, ao menos em parte, à interferência de águas superficiais ou subsuperficiais rasas, em função de saturação local, deficiência de compactação, presença de material inadequado, falhas em juntas e avarias em tubulações-guia. Essa condição poderia induzir leituras não representativas da condição hidráulica efetiva do meio monitorado.

Do ponto de vista metodológico, o caso reforça que a interpretação de leituras piezométricas anômalas deve considerar simultaneamente o contexto de projeto, o histórico construtivo, o comportamento dos instrumentos correlatos, a resposta dos dispositivos drenantes, a influência hidrológica sazonal e a condição física dos próprios instrumentos. Essa abordagem permite separar hipóteses de natureza estrutural, hidrogeológica, hidráulica, construtiva e instrumental, reduzindo o risco de conclusões precipitadas e favorecendo decisões proporcionais à condição observada.

A ocorrência demonstra que a confiabilidade de um sistema de auscultação não depende apenas da existência dos instrumentos ou da regularidade das campanhas de leitura, mas também da preservação das condições físicas de instalação, da integridade dos selos, da compactação do entorno, da proteção superficial e da eficiência da drenagem local. Deficiências executivas localizadas, eventualmente remanescentes da fase de implantação, podem manifestar-se tardiamente durante a operação, sobretudo sob ciclos repetidos de umedecimento e maior incidência pluviométrica, comprometendo a representatividade das leituras.

Sob essa perspectiva, a ocorrência no Dique 14C constitui exemplo de investigação progressiva, verificação física dos instrumentos e validação pós-intervenção, com potencial de orientar a análise de situações semelhantes em outras estruturas de barramento.

9. CONCLUSÕES

O estudo de caso do Dique 14C da UHE Belo Monte demonstrou a importância da interpretação integrada e progressiva de dados de instrumentação geotécnica para o diagnóstico de leituras piezométricas anômalas. A identificação, em fevereiro de 2025, de elevações atípicas em seis piezômetros de tubo aberto localizados na faixa de jusante constituiu gatilho técnico relevante para investigação, mas não evidência isolada de comprometimento da segurança global da estrutura.

A ocorrência apresentou complexidade particular por envolver instrumentos instalados em região hidraulicamente sensível, associada à proteção de talvegue da ombreira esquerda, com dispositivos específicos de drenagem e histórico de canalículos na fundação. Esse contexto justificou postura conservadora na avaliação de hipóteses relacionadas a caminhos preferenciais de percolação e eventual erosão interna regressiva.

O diagnóstico integrado permitiu avaliar hipóteses com diferentes graus de probabilidade e criticidade, incluindo resposta sazonal do lençol freático, perda de eficiência da drenagem local, processo de percolação interna alimentado pela carga hidráulica do reservatório e perda de integridade dos sistemas de selagem ou tubulações-guia. A análise progressiva indicou que as hipóteses de maior criticidade não encontravam suporte no comportamento dos instrumentos correlatos, nos dispositivos drenantes e na resposta global da estrutura.

As investigações de campo indicaram que as leituras anômalas estavam associadas predominantemente à perda de representatividade dos registros piezométricos, em função de fatores localizados no entorno dos instrumentos, incluindo deficiência de drenagem superficial, saturação do solo, compactação inadequada, material impróprio e falhas em tubulações-guia ou juntas de conexão. As ações corretivas executadas restabeleceram condições adequadas de instalação, resultando em leituras mais estáveis, menos sensíveis aos eventos pluviométricos e compatíveis com o comportamento histórico dos instrumentos.

Conclui-se que a ultrapassagem de níveis de controle deve ser tratada como ponto de partida para investigação técnica estruturada, e não como conclusão automática sobre a condição de segurança de uma estrutura. O caso reforça a importância de diagnósticos integrados, da validação pós-intervenção e da qualidade executiva dos sistemas de instalação, proteção e drenagem superficial como elementos essenciais para a confiabilidade da instrumentação em fase operacional.

10. PALAVRAS-CHAVE

Instrumentação de barragens; piezômetros de tubo aberto; leituras piezométricas anômalas; diagnóstico integrado; proteção de talvegue; drenagem superficial; representatividade das leituras; segurança de barragens.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] NORTE ENERGIA S.A. (s.d.) – Projeto de Instrumentação do Dique 14C. Desenho RI3-D14C-PCE-CIO-DE-0001.

[2] NORTE ENERGIA S.A. (2017) – Manual de Instrumentação do Dique 14C: procedimentos, frequências de leitura e níveis de atenção/alerta. Documento RI3-D14C-PCE-CIO-MA-0001.

[3] NORTE ENERGIA S.A. (2026) – Relatório Técnico de Manutenção e Investigação: Dique 14C – Alterações nas Leituras de Instrumentação da Estrutura. Superintendência de Manutenção, Gerência de Segurança de Barragens e PAE. Abril

de 2026.

[4] NORTE ENERGIA S.A. (2025) – Relatório de Inspeção de Segurança Regular: Dique 14C, período 10/2024 a 10/2025. Documento RI-D14C-NES-CSB-RC-0011-00. Vitória do Xingu/PA, novembro de 2025.

[5] SBB ENGENHARIA / NORTE ENERGIA S.A. (2026) – Relatório técnico sobre o comportamento dos diques a partir da instrumentação de auscultação até março de 2026. Documento RE-SBB-USBM-176-R0.

	**João Francisco Alves SILVEIRA** Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos (USP, 1970), Mestre em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP, 1976). Diretor Técnico da SBB Engenharia, atua como consultor em instrumentação e segurança de barragens, com experiência em projetos, inspeções e análise de comportamento de barragens no Brasil e no exterior.
	**Bruno dos Santos da SILVA** Engenheiro Civil pela Anhanguera de Rondonópolis – MT (2015). Cursando pós-graduações em Segurança de Barragens e em Engenharia de Custos, Licitações e Contratos com ênfase em BIM. Atua na Norte Energia como Engenheiro Sênior, com experiência em grandes obras de infraestrutura.
	**Marcus Farias Aires NOBREGA** Engenheiro Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR, 2014), cursando pós-graduações em Segurança de Barragens (IDD, 2026) e em Engenharia Geotécnica (PUC Minas, 2026). Atua na Norte Energia como Engenheiro de Segurança de Barragens, com experiência em projetos de usinas hidrelétricas.
	**Josielso Balieiro BORGES** Engenheiro Civil pela Universidade Pitágoras (2021) e Técnico de Mineração pela escola Técnica Sistema Organizacional Técnico Regular (2005), com experiência em Inspeção de Segurança Regular e análise de instrumentação de auscultação. Atua na Norte Energia como Técnico de Segurança de Barragens.
	Leandro Carvalho LIMA



Técnico em Mineração formado pelo Sistema Organizacional Técnico Regular – SOTER (2009). Possui experiência em controle de qualidade de construção de barragens, diques e eclusas, geotecnia, geologia e intervenções de segurança de barragens. Atua na Norte Energia como Técnico Especialista em Segurança de Barragens.

ESTUDO DE PRECIPATAÇÃO E ANOMALIAS EM BARRAGENS

Danielle de Araújo
Engenheira Geotécnica - Vale

Mateus LÍBANO
Engenheiro Civil - Vale

Fernanda MARTINS
Engenheira Civil - Vale

Alexandre CRISTINO
Gerente Técnico (RTFE) - Vale

Atila DOS SANTOS
Gerente Técnico - Vale

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação integrada entre índices pluviométricos e o surgimento de anomalias em barragens de rejeito localizadas em uma mina de ferro a céu aberto em Minas Gerais. Foram analisadas séries históricas diárias e subdiárias de precipitação (2009–2025), associadas a um banco de dados com mais de 2.400 anomalias registradas entre 2018 e 2025. A análise combinou métodos estatísticos de frequência local (Gumbel) e regional (equação IDF), além de testes estatísticos e correlação temporal entre eventos chuvosos e ocorrências de anomalias.

Embora o teste qui-quadrado tenha indicado associação entre chuva e anomalias, observou-se elevada dispersão nos dados, o que impossibilitou a definição de limiares únicos baseados exclusivamente no histórico observado. Como alternativa, este estudo propõe um critério dinâmico de bloqueio temporário de acesso baseado em quantis pluviométricos com tempo de retorno de 2 anos aplicados a múltiplas durações (1 hora a 7 dias).

O trabalho demonstra que a integração de dados pluviométricos, instrumentação geotécnica e gestão operacional permite decisões mais rápidas e seguras, garantindo acesso monitorado às estruturas mesmo em períodos chuvosos. O estudo configura um caso de sucesso replicável para gestão de risco em barragens.

ABSTRACT

This work presents an integrated assessment between rainfall indices and the occurrence of anomalies in tailings dams located in an open-pit iron ore mine in Minas Gerais, Brazil. Daily and sub-daily historical precipitation series (2009–2025) were analyzed and correlated with a database comprising more than 2,400

anomalies recorded between 2018 and 2025. The analysis combined local (Gumbel) and regional (IDF equation) statistical frequency methods, as well as statistical tests and temporal correlation between rainfall events and anomaly occurrences.
Although the chi-square test indicated an association between rainfall and anomalies, a high degree of data dispersion was observed, preventing the definition of unique thresholds based solely on the observed historical record. As an alternative, this study proposes a dynamic criterion for temporary access restriction based on rainfall quantiles with a 2-year return period, applied to multiple durations (from 1 hour to 7 days).
The study demonstrates that the integration of pluviometric data, geotechnical instrumentation, and operational management enables faster and safer decision-making, ensuring monitored access to structures even during rainy periods. This approach represents a replicable success case for risk management in tailings dams.

1. INTRODUÇÃO

Eventos pluviométricos intensos e prolongados são reconhecidos como fatores relevantes para o surgimento de anomalias em estruturas geotécnicas, especialmente em barragens de rejeito. No contexto da mineração brasileira, a gestão de risco associada à chuva é frequentemente realizada com base em limiares pluviométricos simplificados, que nem sempre refletem adequadamente a variabilidade temporal e espacial das precipitações.

Este trabalho apresenta um estudo aplicado às barragens do complexo minerário de Congonhas, Minas Gerais, nas quais o acesso é tradicionalmente restringido durante eventos pluviométricos de elevada intensidade, adotando-se como referência o limiar de 30 mm/dia. Nesse contexto, o estudo concentrou-se na integração entre dados pluviométricos e registros de anomalias, com o objetivo de avaliar a efetividade dos critérios atualmente empregados, bem como seus impactos na operacionalidade das estruturas. Adicionalmente, buscou-se propor uma abordagem mais robusta e representativa, fundamentada em análises estatísticas, séries históricas de precipitação e dados observacionais.

Além disso, busca-se demonstrar que, por meio de instrumentação adequada, padronização de processos e comunicação eficiente, é possível garantir acesso seguro e assistido às estruturas, permitindo a execução de atividades essenciais de manutenção e conservação.

Nos itens subsequentes será apresentado a metodologia e desenvolvimento do estudo.

1.1 Base de dados e caracterização pluviométrica

Foram utilizadas séries históricas de duas estações pluviométricas localizadas próximo as barragens em estudo para analisar a ocorrência de eventos pluviométricos superiores a 30mm e sua frequência a partir das estações pluviométricas existentes, sendo elas:

- Estação - Pluviômetro (dados diários de 2009 a 2025)
- Estação - Pluviógrafo VEXUS

A análise indicou que eventos de chuva de 30mm em 24 horas ocorrem 86% e 88% dos números de registros, enquanto eventos superiores a 30 mm/dia ocorrem entre 12% e 14% do tempo, evidenciando alta frequência desse limiar, enquanto frequências pluviométricas.

A discretização temporal (de 10 em 10 minutos) dos dados coletados na estação automática VEXUS possibilitou as análises subdiárias para esses dias com precipitações maiores que 30 mm. Seguem três exemplos dessa análise.

- No dia 13/11/2024: Precipitação total de 115 mm em 24 horas, sendo 103 mm em 3 horas (11:00 às 14:00 hs) e 56 mm na hora mais crítica (11:30 às 12:30 hs), conforme distribuição apresentada na Figura 1;
- No dia 17/03/2025: Precipitação total de 73 mm em 24 horas, sendo 58 mm na hora mais crítica (14:20 às 15:20 hs), conforme distribuição apresentada na Figura
- No dia 23/01/2024: Precipitação total de 81 mm em 24 horas, concentrada entre 16:00 e 24:00 horas (intervalo de 8 horas), conforme distribuição apresentada na Figura 3.

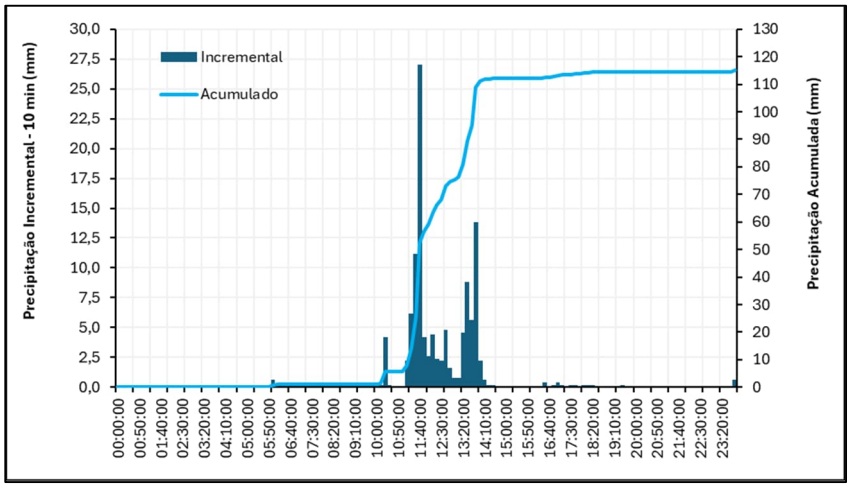


Figura 1 – Análise subdiária da estação VEXUS no dia 13/11/2024.

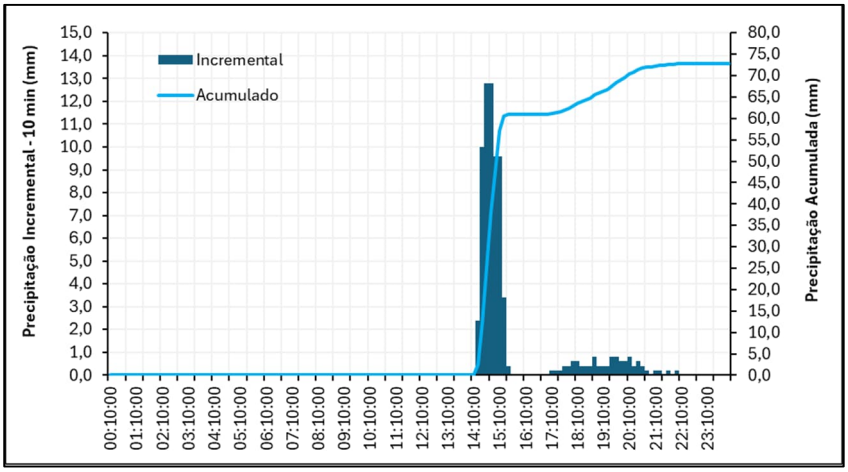


Figura 2 - Análise subdiária da estação VEXUS no dia 17/03/2025.

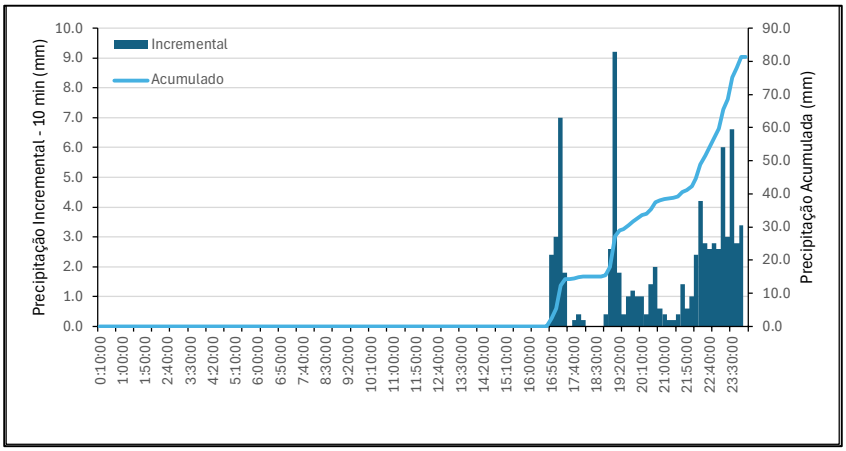


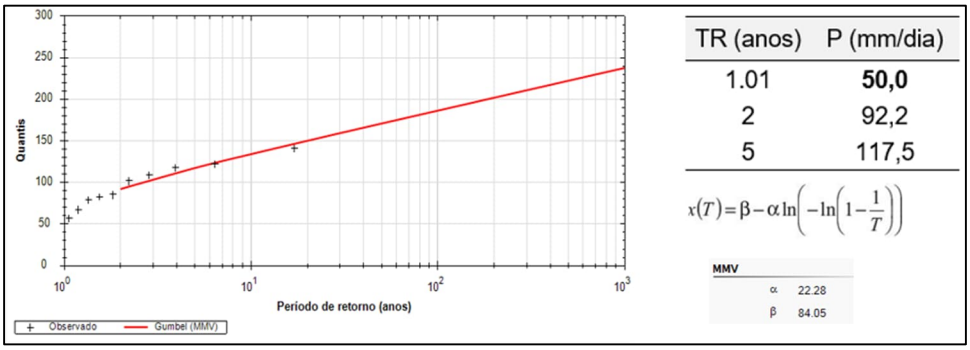
Figura 3 - Análise subdiária da estação VEXUS no dia 23/01/2024.

1.2 Base de dados e caracterização pluviométrica

A análise estatística foi conduzida por:

- Distribuição de Gumbel (frequência local) – Figura 4;
- Equação IDF regional (POTAMOS, 2020) (Frequência regional) – Figura 5 e 6.

Os resultados indicaram que precipitações da ordem de 50 mm/24h possuem tempo de retorno próximo de 1 ano, evidenciando que limiares operacionais baseados nesse valor são altamente frequentes.



TR (anos)	P (mm/dia)
1.01	**50,0**
2	92,2
5	117,5

$$x(T) = \beta - \alpha \ln\left(-\ln\left(1-\frac{1}{T}\right)\right)$$

Figura 4 - Análise de frequência local do pluviômetro - Curva de frequência (Gumbel)

A partir da equação de chuvas intensas idf regional elaborada por POTAMOS (2020), e dos parâmetros de posição e escala adimensional da distribuição estatística de Gumbel, apresentados no referido estudo, pode-se estimar as chuvas de projeto na região para baixos tempos de retorno (alta frequência de ocorrência) e diferentes durações (de 1 hora até 7 dias), apresentados na Tabela 1 e ilustrado na Figura , com destaque para o quantil de 52,4 mm correspondente à chuva com TR de 1,01 ano e duração de 24 horas, enquanto o critério adotado anteriormente representa duração próxima a 3 horas para TR 1,01 ano.

Tabela 1 - Quantis de chuvas de projeto para TRs de 1,01, 2 e 5 anos adaptado de POTAMOS (2011).

Duração (horas)	Precipitação (mm)		
	TR 1,01 ano	TR 2 anos	TR 5 anos
1	22,3	40,8	51,3
2	28,8	52,9	66,8
3	32,7	59,9	75,8
4	35,4	64,9	82,2
6	39,3	72,0	91,3
8	42,0	77,0	97,7
10	44,1	80,9	102,7
12	45,8	84,0	106,7
18	49,7	91,1	115,8
24	**52,4**	96,1	122,2
48	64,9	122,8	157,4
72	80,2	150,1	191,9
120	103,5	193,2	246,8
168	123,0	228,2	291,1

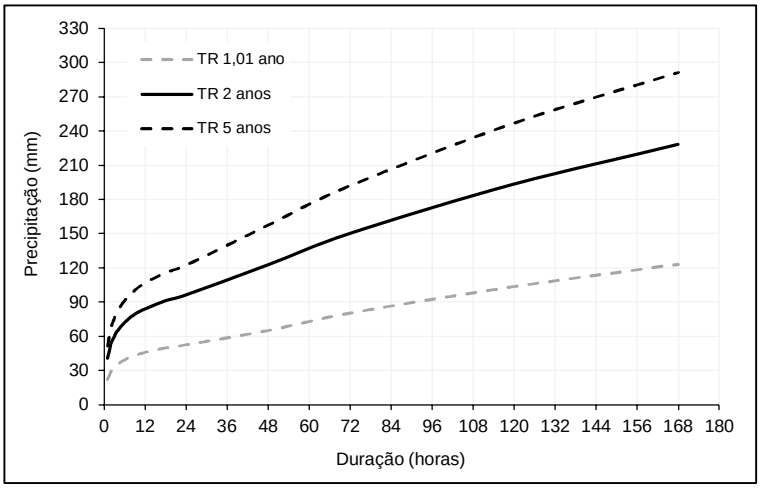


Figura 5 - Quantis de chuvas de projeto para TRs de 1,01, 2 e 5 anos. Fonte: Adaptado de POTAMOS (2011).

1.3 Banco de dados de anomalias

Foi consolidado um banco com 2.418 registros de anomalias, posteriormente filtrados para 490 ocorrências com possível relação com eventos de chuva.

As principais tipologias incluíram:

- Erosão/ravina (38%);
- Problemas de drenagem;
- Infiltração e surgência;
- Escorregamentos e deformações.

A Figura 6 apresenta a distribuição das anomalias por tipologia.

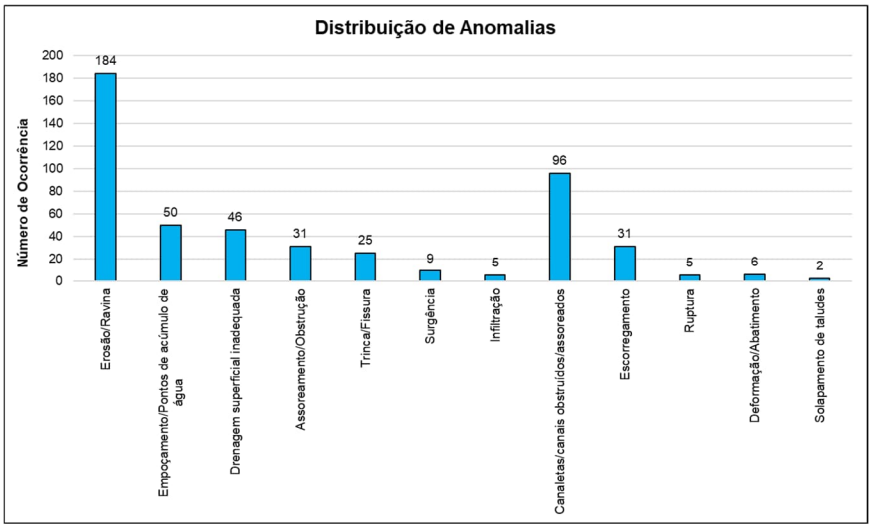


Figura 6 – Distribuição das 12 tipologias de anomalias relacionadas com a chuva.

1.4 Correlação chuva x anomalia

Foram avaliadas correlações considerando janelas antecedentes: 1, 3, 5 e 7 dias

Apesar de tendências qualitativas, os resultados apresentaram elevada dispersão, sem correlação quantitativa consistente.

A Figura 7 apresenta a relação entre a precipitação acumulada e o número de anomalias acumuladas no período analisado (2018 a 2025). Observa-se a ausência de uma correlação direta entre essas variáveis, uma vez que os resultados são influenciados por fatores operacionais, como a restrição de acesso às estruturas após eventos pluviométricos, bem como pelo intervalo de tempo entre a ocorrência e o registro das anomalias.

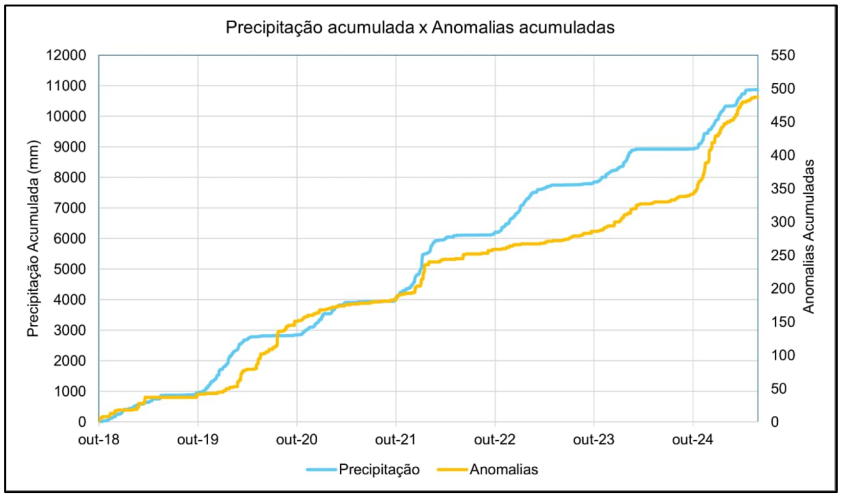


Figura 7 – Relação entre precipitação acumulada e anomalias acumuladas.

O teste estatístico qui-quadrado resultou em $X^2 = 35,89$ (maior que o crítico de 3,84), indicando associação entre variáveis, porém sem capacidade de estabelecer causalidade direta, conforme apresentado na Figura 8.

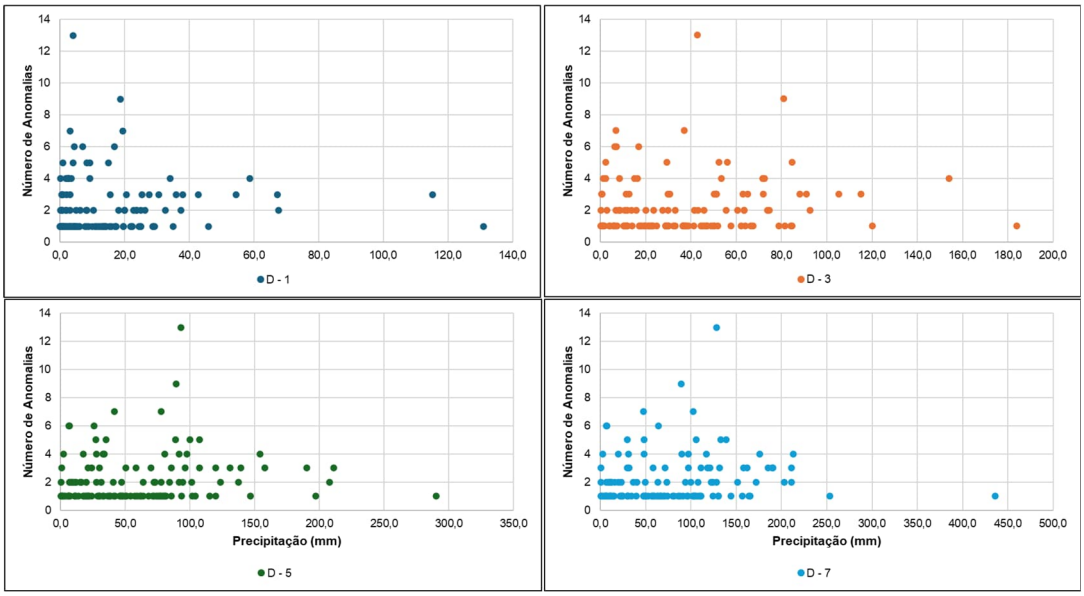


Figura 8 – Dispersão da precipitação e das anomalias para os diferentes períodos analisados.

1.5 Proposta de critério dinâmico

Diante da limitação do método observacional, foi desenvolvido um novo critério baseado em:

- Quantis de precipitação (TR = 2 anos);
- Análise IDF;
- Múltiplas durações (1 h a 7 dias);

O critério é representado por uma curva envoltória, permitindo resposta rápida a eventos intensos e a efeitos acumulativos conforme ilustrado na Figura 9.

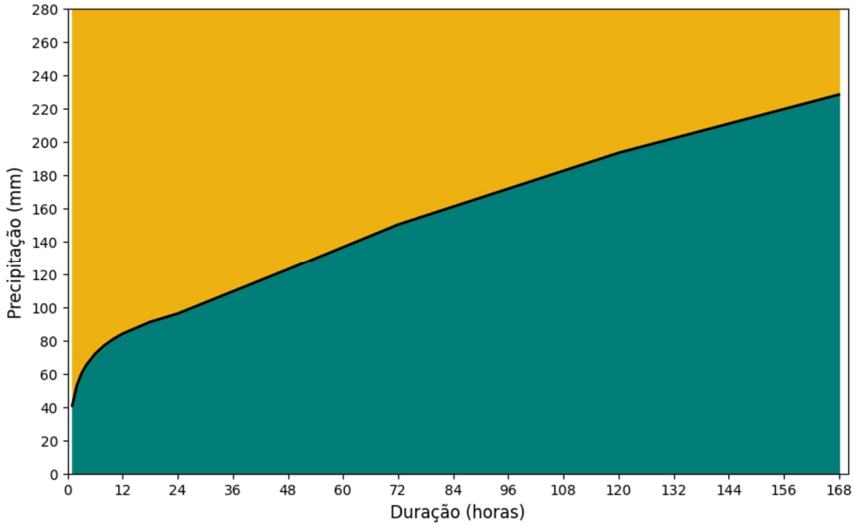


Figura 9 – Novo critério de índices pluviométricos (TR 2 anos – *idf* da Potamos, 2020). A precipitação acumulada em determinada duração mapeada na zona **verde** é indicativa de prosseguimento das atividades, enquanto se enquadrada na zona **amarela** representa a necessidade de bloqueio temporário de acesso e realização de uma inspeção especial.

Por se tratar de um critério destinado ao bloqueio de acesso às estruturas, a aplicação prática indicou a ocorrência de 8 eventos de bloqueio com o novo critério, em contraste com 28 eventos registrados sob o critério anterior (30 mm/dia). Esse resultado evidencia maior eficiência e assertividade operacional na gestão de acessos.

A análise realizada demonstrou que o critério anteriormente adotado, baseado em 30 mm de chuva acumulada em 24 horas, está associado a um período de retorno inferior a 1,01 ano, caracterizando um evento frequente e de baixa relevância para a segurança das barragens.

Em função disso, foi proposto um novo critério fundamentado em quantis de precipitação, curvas IDF e múltiplas durações de chuva, representado por uma curva envoltória capaz de considerar tanto eventos intensos de curta duração quanto efeitos acumulativos. A adoção do período de retorno de 2 anos mostrou-se mais adequada por representar eventos pluviométricos mais significativos, com acumulados próximos de 100 mm em 24 horas, valor compatível com a experiência observada em barragens e outras estruturas geotécnicas da região, onde não foram identificados impactos relevantes à estabilidade ou ao desempenho das estruturas.

Dessa forma, o novo critério proporciona uma avaliação mais consistente e alinhada aos objetivos de monitoramento e gestão de riscos.

2. Discussão – Caso de sucesso e aplicabilidade

O estudo demonstrou que a ausência de uma correlação direta entre precipitação e ocorrência de anomalias não invalida o uso da pluviometria como ferramenta de gestão de risco. Pelo contrário, evidencia a necessidade de uma abordagem integrada, que considere as características regionais, a geologia local, o histórico de ocorrências, a distribuição espacial de pluviômetros próximos aos barramentos e a realização sistemática de inspeções geotécnicas.

A incorporação desses elementos de forma estruturada contribui significativamente para o aumento da assertividade e da confiabilidade dos critérios de bloqueio propostos, permitindo tomadas de decisão mais consistentes, seguras e compatíveis com a realidade operacional das estruturas.

Como caso de sucesso, destacam-se os seguintes pontos:

- Implantação de instrumentação pluviométrica automática e confiável;
- Uso de dados subdiários (alta resolução);
- Consolidação e padronização de banco de anomalias;
- Definição de critério dinâmico e não fixo;
- Integração com equipes operacionais e comunicação eficiente.

A abordagem adotada permitiu:

- Redução de bloqueios desnecessários;
- Melhoria na tomada de decisão em tempo real;
- Continuidade segura das atividades de inspeção e manutenção;
- Aumento da confiabilidade operacional.

Esse modelo é plenamente replicável em outras operações, desde que haja dados consistentes e integração entre áreas.

3. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se:

- Não foi possível estabelecer relação causal direta entre precipitação e anomalias, devido à alta dispersão dos dados;
- O critério tradicional (30 mm/dia) mostrou-se excessivamente conservador e operacionalmente limitante;
- A adoção de um critério dinâmico baseado em IDF e múltiplas durações é mais eficaz;
- A pluviometria não deve ser utilizada isoladamente como parâmetro crítico;
- A integração com instrumentação geotécnica (piezometria, deslocamentos etc.) é essencial.

Por fim, destaca-se que a combinação entre dados, tecnologia, processos e governança permitiu a implementação de um sistema robusto, garantindo segurança operacional e viabilidade de manutenção das estruturas, caracterizando um modelo replicável de gestão de risco em barragens, principalmente em períodos chuvosos.

4. PALAVRAS-CHAVE

Barragens de rejeito; precipitação; anomalias geotécnicas; gestão de risco; inspeção de barragens.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (2025) – ICMM. *Tailings Management – Good Practice Guide*, Reino Unido.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. (2007), *Hidrologia Estatística*. CPRM, Brasil.

TRIOLA, M. F. (2017), *Introdução à Estatística*. LTC, Estados Unidos.

PINHEIRO, M. C.; CAMPOS, C. A. O. Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração. 2. ed. rev. Belo Horizonte: POTAMOS Engenharia e Hidrologia; Vale S.A., 2011.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

Gestão de risco, Monitoramento e Projeto de Recuperação da Drenagem de Pé da UHE Salto-GO

Luan Rodrigo de ALMEIDA SOUZA
Engenheiro Civil, Msc. Intertechne Consultores S.A.

Alex Martins CALCINA
Engenheiro Civil - Intertechne Consultores S.A.

Rodrigo Miranda CARVALHO
Engenheiro Civil – CTG Brasil

Juliano de SÁ RAMOS
Engenheiro Civil – CTG Brasil

RESUMO

Em resposta à pressão da sociedade pela garantia da segurança das barragens existentes, grandes empreendedores vêm buscando continuamente a melhoria da gestão da segurança de suas barragens, através de novos protocolos de identificação, mitigação e gerenciamento dos riscos. O presente trabalho apresenta um estudo de caso da barragem de terra da margem direita da UHE Salto, onde foi identificado durante a rotina de inspeções sinais de comportamento anômalo do sistema de drenagem no pé da barragem. Em se tratando de uma canaleta de drenagem executada sob uma berma de equilíbrio da barragem, a recuperação do sistema consiste de uma obra de grande porte, exigindo da equipe técnica do empreendedor e das consultorias envolvidas a previsão de um plano de acompanhamento e intensificação do monitoramento até a definição do timing técnico e operacional para execução das ações corretivas necessárias. O desenvolvimento do trabalho seguiu as seguintes etapas: 1) Estudos para diagnóstico e entendimento dos mecanismos de falha e evolução das manifestações das anomalias associadas; 2) Intensificação do monitoramento a partir da criação de uma rotina de inspeções visuais periódicas, instalação de novos instrumentos, monitoramento a partir de televisionamento e medidas de vazão e volume de material carreado; 3) Desenvolvimento do projeto de recuperação e de instrumentação permanente; 4) Elaboração de um plano de contingência e ações emergenciais considerando cenários críticos. As ações definidas foram implementadas gradativamente e desenvolvidas ao longo de aproximadamente dois anos enquanto se planejava a logística das obras. Em geral o quadro se manteve estável até março de 2021, com evolução na deterioração da tubulação de concreto e aumento do volume de material carreado, entretanto não houve sinais de percolação descontrolada (erosão interna). As ações realizadas foram acompanhadas pela equipe de segurança de barragens e gestão de riscos da CTG HeadQuarter na China, e as obras de recuperação foram executadas entre abril e outubro de 2021, na janela hidrológica favorável.

ABSTRACT

In response to pressure from society to guarantee the safety of existing dams, great entrepreneurs are continually seeking to improve the management of the safety of their dams, through new protocols for the identification, mitigation and management of risks. The present work presents a case study of the earth dam on the right bank of the Salto HPP, where signs of anomalous behavior of the drainage system at the foot of the dam were identified during the inspection routine. As the drainage channel were executed under the dam's equilibrium berm, the system's recovery consists of a large work, requiring the technical team of the entrepreneur and the consultants involved to provide a plan for intensifying the monitoring until the definition of the technical and operational timing for the execution of the necessary corrective actions. The development of the work followed the following steps: 1) Studies to better understand the mechanisms of failure; 2) Intensification of monitoring through a routine of periodic visual inspections, installation of new instruments, ROV-aided inspections and measurements of flow and volume of material carried; 3) Development of the recovery project and permanent instrumentation; 4) Elaboration of a contingency plan and emergency actions considering critical scenarios. The defined actions were gradually implemented and developed over approximately two years while planning the logistics of the works. In general, the picture remained stable until March 2021, with an evolution in the deterioration of the concrete pipe and an increase in the volume of material carried, however, there were no signs of uncontrolled percolation (internal erosion). The actions were monitored by the dam safety and risk management team of CTG Head Quarter in China, and the works were carried out between April and October 2021, in a favorable hydrological window.

1. INTRODUÇÃO

O risco relacionado a uma estrutura pode ser definido como a medida da probabilidade e intensidade de um efeito adverso para a vida, saúde ou meio ambiente ICOLD [1].

As barragens são estruturas vitais para o desenvolvimento socioeconômico do país. No entanto, tais estruturas expõem a população e o meio ambiente a riscos e impactos muito significativos, uma vez que a falha de uma barragem possui, quase sempre um dano associado alto que envolve a perda de vidas humanas e impactos ambientais de grande magnitude. No Brasil, frente aos acidentes que ocorreram na última década, houve uma mudança de postura geral que envolveu a sociedade civil organizada, legislação, órgãos e entidades públicas e privadas, com objetivo de melhorar as boas práticas em relação a segurança de barragens.

Neste contexto, a análise de risco torna-se uma importante ferramenta para a avaliação da performance e segurança desse tipo de empreendimento. Estando, portanto, em linha com a Lei 14.066/2020, que alterou a Lei 12.334/2010, e estabeleceu sanções mais rigorosas, conforme os danos causados pelo empreendimento.

Especificamente, em se tratando de barragens de terra, onde segundo as publicações do ICOLD [1] e ICOLD [2] as causas relacionadas à percolação pela fundação e pelo

corpo da barragem (erosão interna) juntas somam mais da metade das causas de ruptura, a gestão do risco compreende a fase de entendimento dos mecanismos de falha e o conhecimento de como é a manifestação da anomalia para permitir um projeto de instrumentação assertiva direcionada ao problema e da definição do timing para executar as ações corretivas.

Tendo em vista o exposto acima, este trabalho em o objetivo de apresentar o estudo de caso da UHE Salto, onde durante as inspeções de rotina realizada em 2018 foi identificada uma anomalia no pé da barragem em um trecho onde os elementos de drenagem originalmente projetados, trincheira drenante e canaleta coletora, foram recobertos por uma berma de equilíbrio executada no fim do período de construção em 2010, o que danou o funcionamento da drenagem livre, gerando carreamento de material e pequenas subsidências.

O presente trabalho detalha o processo de gestão e manutenção de riscos utilizado na identificação e diagnóstico da anomalia no sistema de drenagem e no planejamento à longo prazo da intervenção, tomando todas as ações necessárias para acompanhar a evolução das anomalias e criando um plano de contingência conforme as boas práticas de segurança de barragens.

2. ESTUDO DE CASO – UHE SALTO

2.1. Descrição do Empreendimento e Unidade de Análise

A UHE Salto está localizada no rio Verde, afluente pela margem direita do rio Paranaíba, nos municípios de Caçu (margem esquerda) e Itarumã (margem direita), estado de Goiás. O arranjo geral do Empreendimento, conforme apresentado na Figura 1, constitui-se de: um barramento, compreendendo uma barragem de terra fechando toda a ombreira direita e o leito do rio; uma estrutura com vertedouro dotado de duas comportas tipo segmento, situado na margem esquerda, próxima ao leito do rio; uma estrutura com tomada d'água junto ao vertedouro, à sua esquerda; e barragem de terra fechando o restante da ombreira esquerda. Na mesma figura é possível ver o estaqueamento, representado a cada 100m, que identifica cada trecho de interesse.

A extensão total do barramento é aproximadamente 2.500m e com altura máxima de 36m.

O sistema de drenagem interno da barragem é composto por filtro vertical, dreno horizontal e uma trincheira drenante no pé do aterro, contando ainda com uma canaleta de drenagem a jusante da trincheira. A Figura 2 apresenta uma seção transversal da barragem e na Figura 3 um detalhe do pé da barragem da margem direita que ilustra a situação após a finalização da construção, com a canaleta tapada pelo aterro da berma no pé da barragem da margem direita.

A casa de força tem 2 unidades geradoras do tipo Francis de eixo vertical, com potência instalada total de 116 MW.

A fundação das barragens em ambas as margens é formada por sequência de maciço rochoso basáltico, solos de alteração de basalto, sobrepostos por colúvio de sedimentos finos.

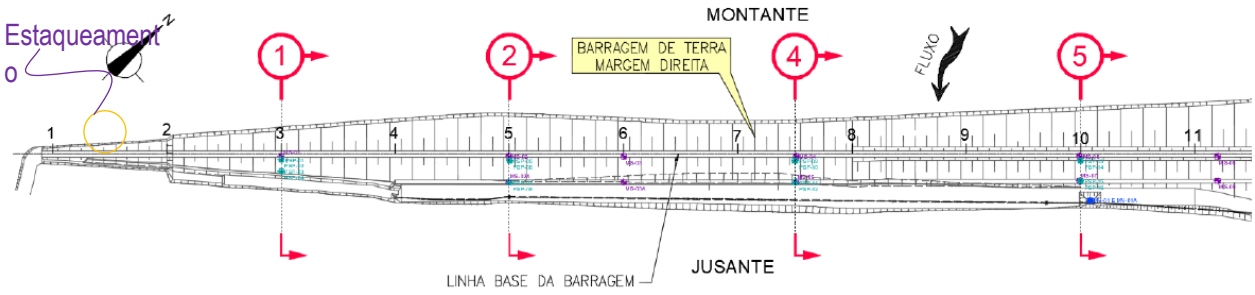


Figura 1.a – Arranjo da UHE Salto – Barragem de terra – Margem direita

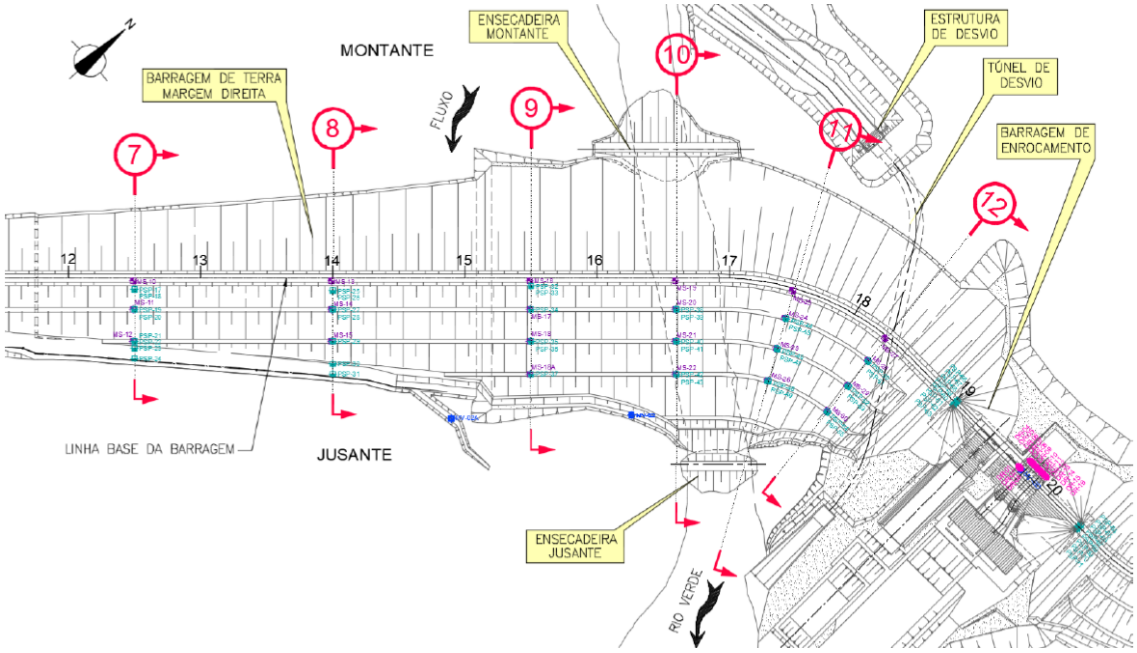


Figura 1.b – Arranjo da UHE Salto – Barragem de terra - Margem Direita e Leito do Rio

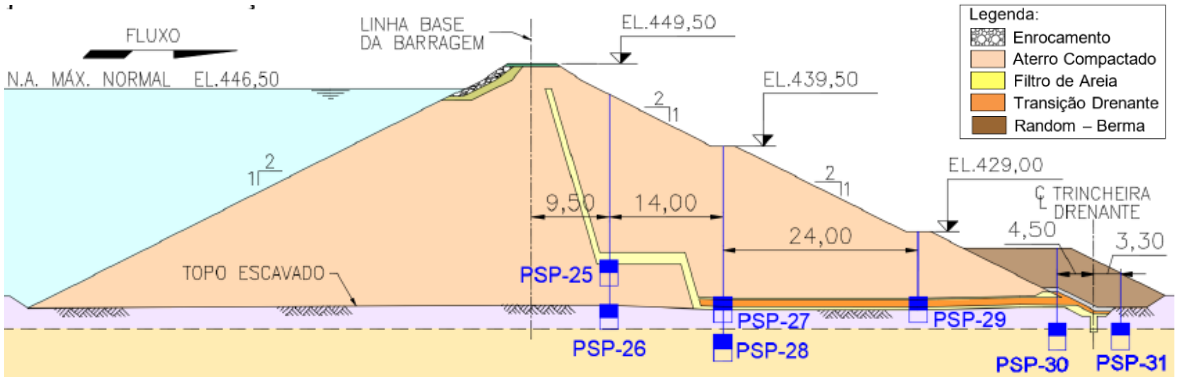


Figura 2 – Seção Representativa da Barragem de Terra (Estaca 14+0,00m)

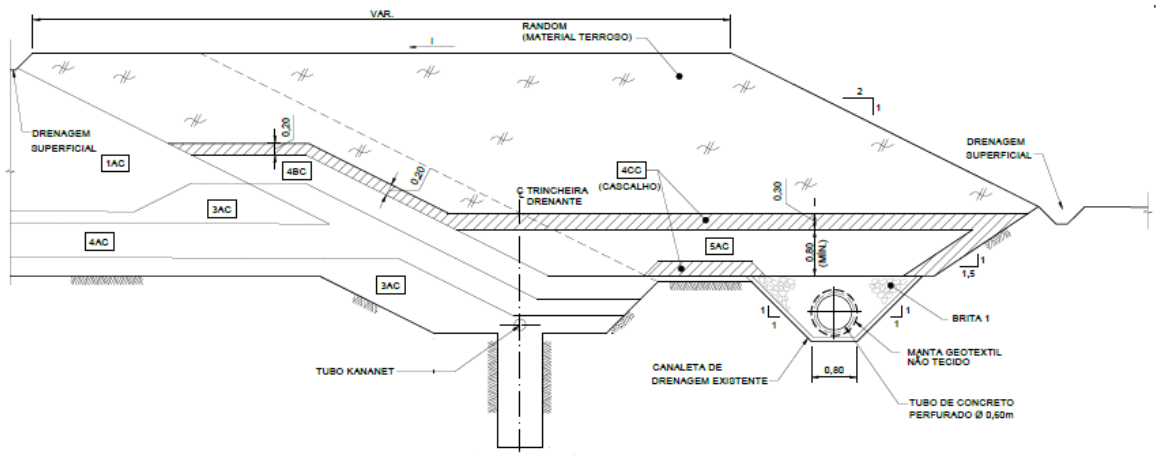


Figura 3 – Pé da Barragem da Margem Direita com destaque para a canaleta aterro

Na Tabela 1 está reproduzida a relação de instrumentos em operação atualmente na barragem da margem direita UHE Salto.

Tabela 1 – Instrumentos instalados na barragem de terra da margem direita da UHE Salto

Instrumentos	Localização	Quantidade	Frequência de Leitura
Piezômetros Standpipe	Seções 1 a 8	31	Quinzenal
	Seções 9 a 12	24	
Medidor de Vazão	Barragem da Margem Direita	5	Quinzenal
Marco Superficial	Barragem da Margem Direita	33	Semestral / Bimestral
Marco Fixo	Área a jusante da barragem	4	Semestral

3. IDENTIFICAÇÃO DA ANOMALIA NO SISTEMA DE DRENAGEM

Por solicitação da equipe técnica da CTG BRASIL foi realizada em janeiro de 2018 uma inspeção da barragem da UHE Salto, onde se constatou a presença de concentração de material fino e granular depositados na caixa de aproximação do medidor de vazão MV-02A, situado na estaca 14+90,00 na margem direita da barragem.

O carreamento de finos foi primeiramente observado durante e após o enchimento do reservatório, em 2010. Durante o enchimento do reservatório, foi detectada uma vazão elevada no sistema interno de drenagem e pressão piezométrica também elevada nos piezômetros situados na fundação da barragem. Em consequência da maior incidência de água e saturação local, detectou-se gradientes de saída suficientes para o início de carreamento de finos areno-siltosos pelas juntas de construção e eventuais fissuras nas canaletas de drenagem.

Em conjunto com as informações coletadas nos relatórios de inspeção e dados de monitoramento de pressões piezométricas e de medidores de vazões, foi realizada uma avaliação do comportamento da barragem. Como produto dessa avaliação, recomendou-se que fossem realizadas filmagens por sistema de inspeção robotizada

e inspeções dos poços de visitas. Essas inspeções visavam avaliar as condições internas dos tubos de drenagem, detectando possíveis anomalias e desgastes dos tubos, identificar e caracterizar o material fino coletado.

As investigações realizadas indicaram que o trecho crítico de degradação do sistema de drenagem está situado entre as estacas 4+00 e 8+00 (estaqueamento na Figura 1). Detectou-se danos localizados na geratriz inferior da tubulação de concreto e trechos com reparos dos tubos. Além disso, verificou-se trechos com concentração de fluxo entre as juntas e desgaste da geratriz inferior do tubo, provavelmente ocasionado pelo arraste de partículas de quartzo e sílica provenientes do material mais arenoso arrastado.

Com base nisso, recomendou-se que fosse recuperado todo o sistema de drenagem situado na região da berma de equilíbrio, com recuperação das linhas de proteção e eliminação do risco de continuidade de carreamento de finos. Para tanto, será substituído o sistema de drenagem de pé por tubos de PEAD e expandida a área abrangida pelo filtro invertido, além da implantação de novos instrumentos para monitoramento da região.

No entanto, em função das restrições de trabalho impostas pela pandemia do COVID-19 e dos riscos associados à saúde das equipes, foi avaliada a possibilidade de postergação das obras para que os trabalhos se desenvolvam dentro do período da janela hidrológica do ano corrente, entre abril e meados para fim de novembro. Para garantir as condições de segurança e identificação de anomalias decorrentes do mau funcionamento do sistema de drenagem, foi proposto o plano de intensificação do monitoramento durante esse período, até início das obras.

4. ANÁLISE DE RISCO E MEDIDAS DE CONTINGÊNCIA

Em função da natureza e importância das obras a serem realizadas, considerando que todas as atividades serão desenvolvidas com o reservatório cheio, foram identificados os riscos apresentados na Tabela 2, inerentes às atividades a serem executadas. São listadas também as medidas de contingência, que visam minimizar a probabilidade de ocorrência de acidentes e a vulnerabilidade das áreas com potencial para serem afetadas.

Na Tabela 2 a seguir estão listados os riscos levantados, assim como o risco associado e medida adotada de mitigação do risco.

Tabela 2 - Identificação dos cenários de risco para as Obras: Ameaça/Risco/Mitigação

Cenário 01	**Ameaça:**	Remoção da berma de equilíbrio e escavação do pé da barragem.
	Risco:	Risco de escorregamento dos taludes pela exposição prolongada a condição de segurança não ideal (FS < 1,50, condição provisória). Nessa situação a instabilização pode ser deflagrada por instabilidade global dos taludes e/ou por um processo de erosão regressiva interna (*piping*).
	Mitigação:	O projeto prevê a execução das obras em trechos reduzidos, de até 50 m entre eixos, para diminuir o tempo de exposição ao risco e permitir, em caso de alguma emergência, a realização de ação imediata. Além disso, estarão disponíveis nas proximidades da praça de trabalho pilhas de material de

		contingência (pedra de mão, brita e areia), que permitam a execução de filtros invertidos para bloquear a ocorrência de processos erosivos.
Cenário 02	**Ameaça**:	Elevação do nível de água no pé da barragem na área escavada.
	Risco:	Risco de escorregamento dos taludes pela elevação do nível freático e exposição prolongada a condição de segurança não ideal (FS < 1,50, condição provisória), por descalçamento.
	Mitigação:	O projeto prevê o controle do nível freático por meio de rebaixamento do nível freático com ponteiras e monitoramento com medidores de nível de água em todos os trechos, além de prever a mobilização de equipamentos reservas que poderão ser acionados rapidamente.
Cenário 03	**Ameaça**:	Alta precipitação durante a execução das obras.
	Risco:	Paralização dos serviços e consequente aumento do tempo de exposição a condição de segurança não ideal, somados ao risco de elevação dos níveis de água e implicação no aumento do risco de escorregamentos.
	Mitigação:	Previsão de início e término das obras em período de estiagem (abril a setembro).
Cenário 04	**Ameaça:**	Falha do sistema de bombeamento.
	Risco:	Inundação da área escavada e elevação do nível freático.
	Mitigação:	Previsão de bombas reserva e redundância de sistema de bombas, peças de reposição para os serviços de rebaixamento do lençol freático, além de bombas reservas para serviços menores de esgotamentos locais.
Cenário 05	**Ameaça:**	Interrupção no fornecimento de energia.
	Risco:	Inundação da área escavada e elevação do nível freático no trecho de intervenção.
	Mitigação:	Previsão de fonte alternativa de energia – gerador a diesel, para o caso de falha ou mau funcionamento. No caso de interrupção no fornecimento de energia deve ser priorizado o serviço de rebaixamento.
Cenário 06	**Ameaça**:	Ausência de iluminação natural no local da obra em período noturno.
	Risco:	A obra será executada em horário comercial, quando a condição de iluminação natural é adequada. Em situações emergenciais, como a necessidade do fechamento rápido da escavação que pode avançar no período noturno, a ausência de iluminação pode causar riscos de execução inadequada do serviço e de acidentes aos colaboradores.
	Mitigação:	Disponibilidade de sistema de iluminação noturna adequada à condição de execução da obra, em caso de necessidade.

Além dos cenários de risco identificado, o estado de emergência se caracteriza quando o cenário encontrado representar alta probabilidade de ruptura da barragem no curto prazo, devendo ser tomadas medidas para prevenção, ou então, redução dos danos decorrentes do colapso da barragem.

A declaração de estado de emergência (Situação de Alerta, Nível 3 descrita no PAE da usina) ocorrerá quando uma das partes envolvidas entender que uma situação adversa encontrada afeta a estrutura da barragem de maneira severa e que a ruptura, ou acidente, pode acontecer a qualquer momento.

Nesse caso faz-se necessário acionar o Plano de Ação de Emergência - PAE da UHE Salto e seguir as ações esperadas para o nível de resposta correspondente ao estado de emergência, que incluem o acionamento de procedimentos de aviso e alerta para evacuação da população localizada a jusante, o protocolo de comunicação interna e externa à defesa civil e demais órgãos e instituições listadas no fluxo de comunicação. Em seguida deve-se definir e implantar as ações preventivas e corretivas previstas no PAE que podem incluir o rebaixamento emergencial do nível do reservatório e adoção de novos procedimentos operacionais até uma nova verificação da situação para declaração de um novo nível de resposta.

Além dos riscos identificados para as atividades de obra, foram identificados os cenários de riscos relacionados à postergação das obras, inicialmente em função do planejamento das obras e posteriormente em função da pandemia de COVID.

Considerando o histórico relativamente estável no acompanhamento das anomalias registradas nos relatórios de inspeção e acompanhamento realizado pela equipe da CTG Brasil, foram propostas medidas de intensificação do monitoramento, conforme descrito em detalhes no item 5.

Na Tabela 3 a seguir está apresentado o plano e medidas de contingência em caso de postergação das obras, assim como o risco associado e medidas de mitigação a serem adotadas.

Tabela 3 – Plano de Ação e Medidas de Contingência – Postergação das obras: Ameaça/Risco/Mitigação

Cenário 01	**Ameaça:**	Subsidências / afundamentos pontuais da berma sobre o tubo de concreto e PVs.
	Risco:	Risco de ocorrência de pontos de erosão desencadeada pelo fluxo constante de água, principalmente nas juntas da tubulação de concreto e encontro com os poços de visita.
	Mitigação:	Realizar inspeções periódicas da tubulação com ROV e inspeções visuais da superfície. Caso seja notado pontos críticos, poder-se-á realizar intervenções pontuais para reparo da tubulação e controle da erosão.
Cenário 02	**Ameaça**:	Elevação do nível freático no pé do corpo da barragem principal.
	Risco:	Risco de escorregamento dos taludes pela elevação do nível freático.
	Mitigação:	Monitoramento a partir dos piezômetros existentes e de novos medidores de nível de água ao longo de toda a berma. Em caso de verificação de elevação do nível de água, poder-se-á realizar intervenções pontuais pela própria equipe da CTG Brasil.
Cenário 03	**Ameaça**:	Indício de erosão interna regressiva (*piping*).
	Risco:	Efeito conjugado de aumento progressivo da vazão de percolação e do carreamento de material fino, ocorrência de subsidências, surgências devido a percolação, zonas visivelmente saturadas em direção ao corpo principal da barragem, erosão em trechos ao longo do sistema de drenagem.
	Ação:	Deverá estar disponível nas proximidades da barragem da margem direita estoque de materiais de contingência (pedra de mão, brita e areia) que permita a rápida execução de filtro invertido para bloquear a ocorrência de processos erosivos.

5. INTENSIFICAÇÃO DO MONITORAMENTO

A seguir é apresenta a Tabela 4, com um resumo das recomendações de intensificação do monitoramento da UHE Salto até o início das obras de recuperação. As frequências de leitura foram estabelecidas baseadas na rotina já implantada pelas equipes de campo do empreendedor.

Tabela 4 – Recomendações para intensificação do monitoramento da UHE Salto

Monitoramento	Local	Quantidade	Frequência de Leitura
Inspeção Local	Toda barragem da margem direita	-	2x Semana
Inspeção com ROV	Todo o comprimento da tubulação (Est. 2+50,00 e a Est. 14+50,00)	6 campanhas	Bimestral
Instalação de Marco Superficial	Dois marcos, em seções a cada 50 m	50	Mensal
Verificação do nível de água no pé da barragem	A cada 100 m	13	2x Semana
Limpeza dos medidores de vazão e registro do volume de material acumulado	MV-01 e MV-02A	-	Quinzenal

5.1. Rotina de Inspeção Local

A partir de 2019 foi implementada uma rotina de monitoramento específica para a região da berma de equilíbrio, com inspeções semanais e registro fotográfico para acompanhamento.

Além da rotina já implementada, o plano de intensificação do monitoramento durante o período de postergação das obras incluiu a inspeção local ao longo da berma, duas vezes por semana, com objetivo de verificar a ocorrência de afundamentos, zonas úmidas e outras manifestações na superfície.

5.2. Acompanhamento da Piezometria

Na barragem de terra da margem direita existem nove seções instrumentadas com o objetivo de monitorar as pressões piezométricas na fundação da barragem e ao longo do tapete drenante.

Todos os instrumentos encontram-se abaixo dos níveis de atenção estabelecidos. De modo geral, os piezômetros presentes no tapete drenante se apresentam sem carga ou com cargas pequenas, e os piezômetros de fundação apresentam leituras estabilizadas nos últimos dois anos.

A Figura 4 ilustra a seção instrumentada da estaca e a Figura 5 e Figura 6 apresentam respectivamente, o histórico da piezometria do corpo da barragem e da fundação.

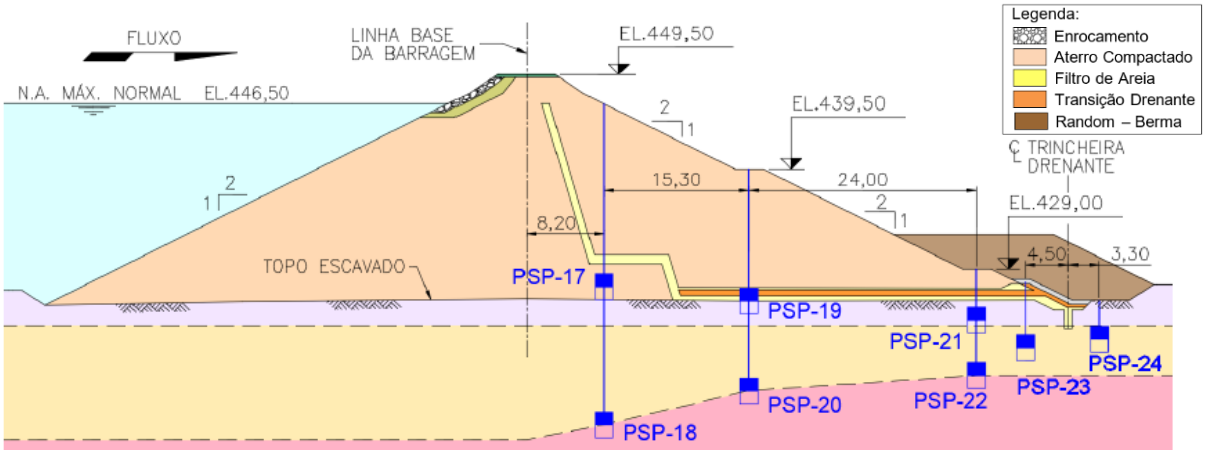


Figura 4 – Barragem de terra da Margem Direita – Seção instrumentada pela Est. 12+50,00

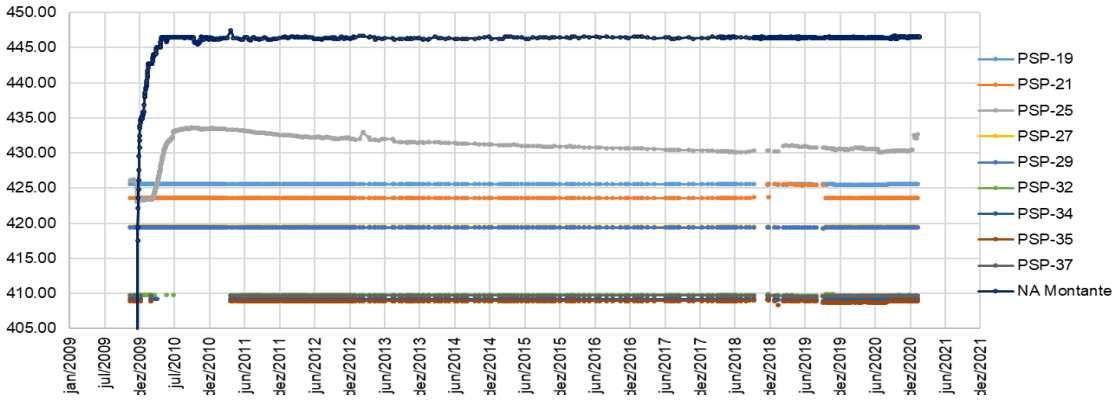


Figura 5 – Histórico de leituras – Piezômetros tapete drenante

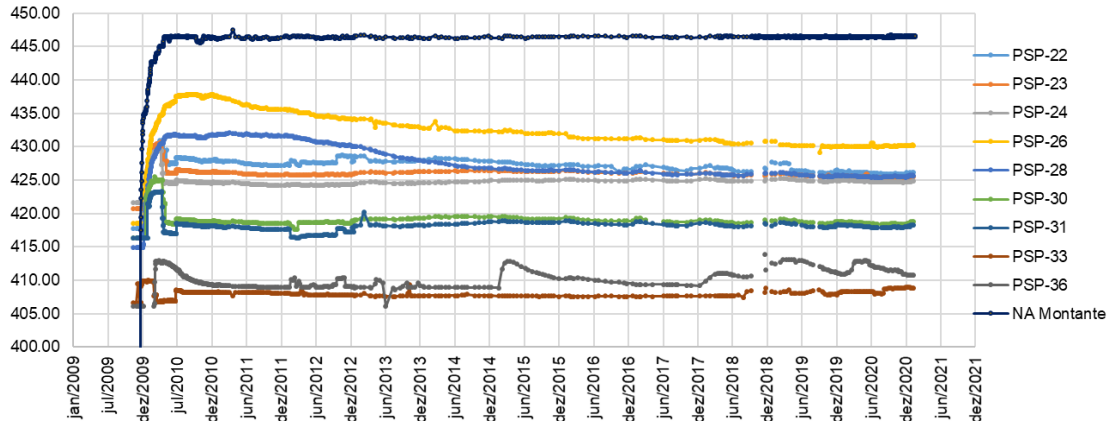


Figura 6 – Histórico de leituras – Piezômetros da fundação

5.3. Obras Preliminares de Desvio da Drenagem Superficial

Foi notado durante as inspeções que durante os períodos de chuva havia contribuição externa de material na caixa dos medidores de vazão proveniente das canaletas de drenagem superficial.

As obras de desvio da drenagem superficial foram executadas entre junho e agosto de 2020, com objetivo de retirar essa contribuição externa e proporcionar maior confiabilidade nas leituras de vazão e volume de material coletado para acompanhamento da degradação da tubulação do sistema de drenagem.

5.4. Obtenção de Material de Estoque e Contrato com Fornecedores de Equipamentos

Também como parte do Plano de Contingência, após a análise de risco foi identificada a necessidade da disponibilidade de materiais em estoque para execução rápida de filtro invertido. Os materiais foram obtidos pela equipe da CTG com volume suficiente para executar um filtro invertido em uma extensão de 50 m no pé da barragem, e foram submetidos para análise da granulometria para confirmar sua adequabilidade como material para execução do filtro invertido.

Ainda, foi verificada, dentro do contrato de fornecimento já existente com empresa da região, a disponibilidade para acionamento rápido e fornecimento de equipamentos de construção e operadores, se necessário.

5.5. Instalação de Novo Marcos Superficiais na Berma de Equilíbrio

Foram instalados novos marcos superficiais para controle topográfico de recalques, pelo menos a cada 50 m ao longo da berma de equilíbrio. Os marcos instalados foram instalados conforme esquema mostrada na Figura 7, dois por seção, um mais a montante próximo ao corpo principal da barragem e um próximo a borda da berma, totalizando 50 novos marcos.

O objetivo do controle foi acompanhar possíveis tendências de movimentação, não percebidas visualmente. Considera-se que para a finalidade do monitoramento a precisão do método é suficiente para indicar deslocamentos provocados pelo avanço das anomalias no sistema de drenagem.

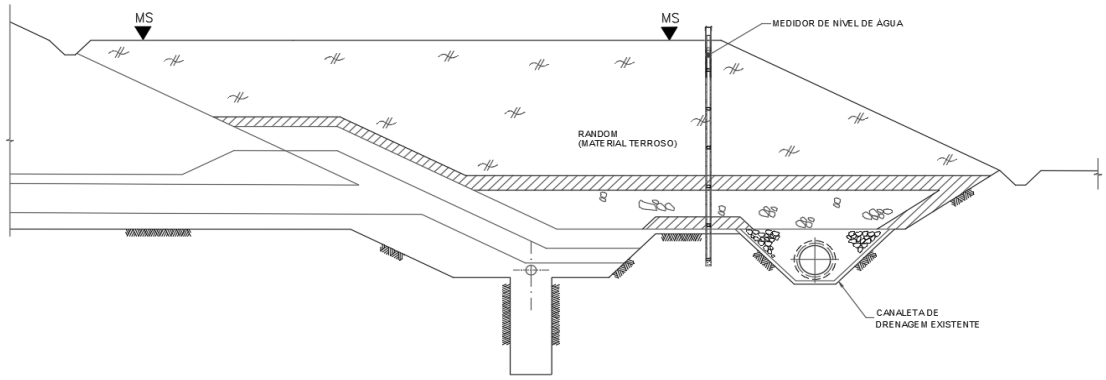


Figura 7 – Ilustração da posição dos marcos superficiais e medidor de nível de água em relação a uma seção típica da berma de equilíbrio

As leituras de controle topográfico realizadas nos novos marcos superficiais sobre a berma, MSB, indicam que não houve movimentação expressiva. A Figura 8 e Figura 9 mostram de forma gráfica, respectivamente, os recalques e deslocamentos horizontais, onde, embora pouco representativo por conta da imprecisão e variabilidade do método, nota-se que não há direcionamento preferencial indicando movimento da berma. Em termos quantitativos, o maior deslocamento no sentido montante-jusante aconteceu no marco MSB-39, medindo deformação de 1,06 cm. O maior recalque foi evidenciado no marco MSB-14, medindo 1,11 cm e a maior movimentação da seção no marco MSB-08 de 1,16 cm.

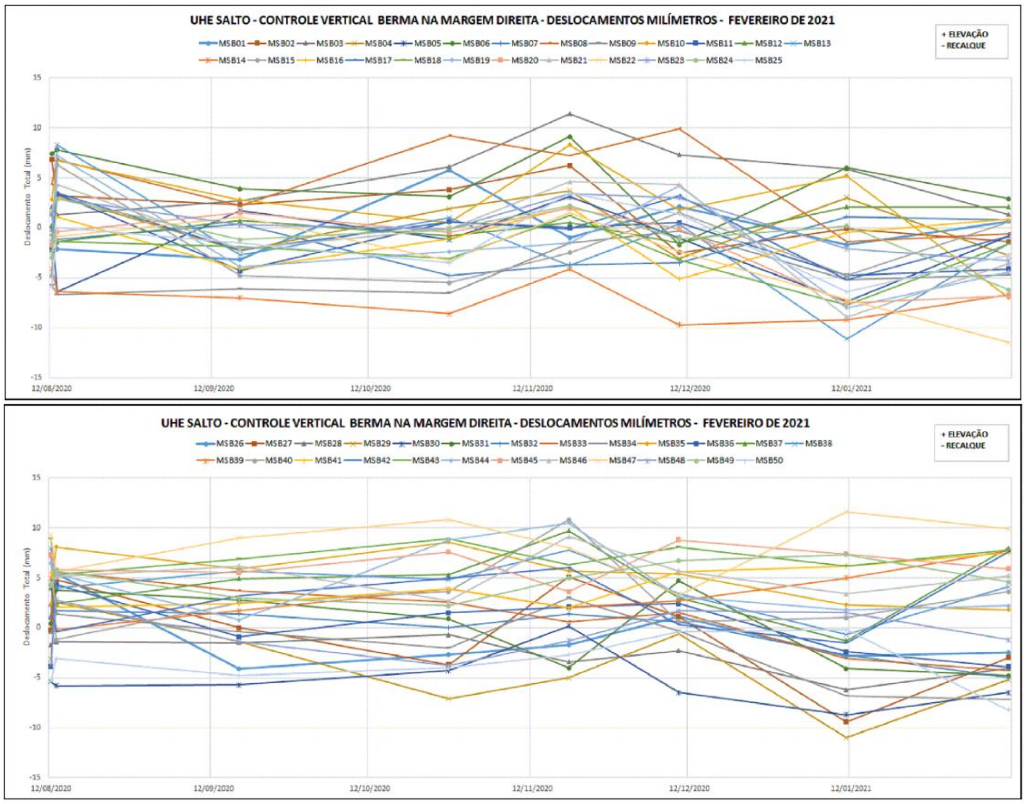


Figura 8 – Recalques – Novos Marcos Superficiais

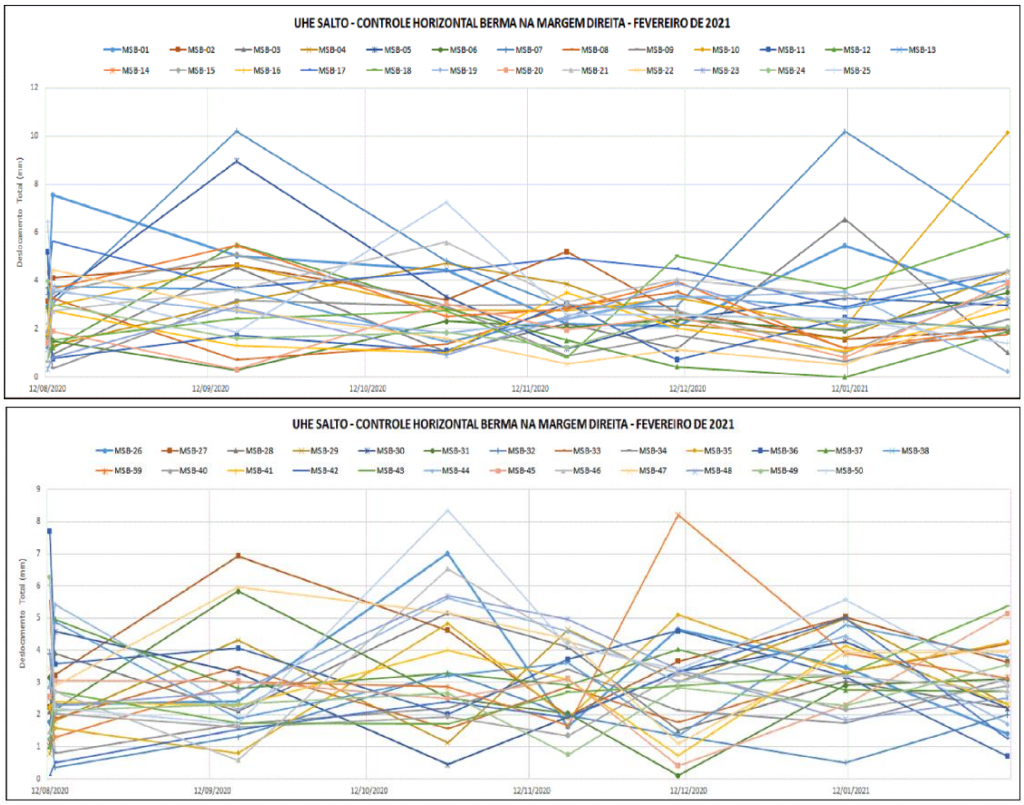


Figura 9 – Deslocamentos horizontais – Novos Marcos Superficiais

5.6. Instalação de Medidores de Nível de Água

Os medidores de nível de água foram instalados ao longo da berma de equilíbrio, na posição ilustrada na Figura 7, com objetivo de acompanhar periodicamente sinais de elevação ou decréscimo abrupto do nível de água, indicando a incapacidade do sistema de drenagem em captar a vazão de percolação ou novos rompimentos na tubulação. A conclusão da instalação dos 14 novos medidores ocorreu em novembro de 2019.

De modo geral, verificou-se que os níveis permaneceram estáveis. Os valores de referência para acompanhamento foram definidos a partir da cota de topo do tubo de concreto perfurado na canaleta de drenagem. Dessa forma, em conjunto com a análise da lâmina de água dentro da tubulação chegada por ROV, esses valores são indicativos da eficiência do sistema de drenagem em captar a água de percolação e direcionar para os medidores de vazão, e não estão ligados à estabilidade do maciço.

A análise dos valores mostra que os medidores NA002, NA003 e NA004 localizados entre as estacas 3+0,00 e 6+0,00, apresentam níveis de água próximos ou superiores à cota da tubulação, servindo de indício de insuficiência no sistema de drenagem. Esses medidores de nível d'água encontram-se em sela topográfica, que pode indicar maior fluxo de água na seção. Em paralelo, verificou-se infiltração pelo topo do tubo e água corrente no fundo do tubo de drenagem na inspeção por ROV na região do poço de visita na estaca 5+0,00.

5.7. Inspeção Periódica da Tubulação de Drenagem com ROV

Foi contratada empresa especializada para realização de novas inspeções com sistema de televisionamento utilizando ROV (*Remotely Operated Vehicle*) para acompanhamento da situação da degradação da tubulação de drenagem, com a frequência bimestral, para investigar se havia uma piora visível da condição da tubulação ao longo dos meses até o início das obras. A Figura 10 ilustra o modelo utilizado e o posicionamento do ROV na tubulação a partir do poço de visita.



Figura 10 – Ilustração do robô utilizado da inspeção e posicionamento no poço de visita

A última campanha de investigação da tubulação e de ensaio do material coletado havia sido realizada entre outubro de 2018 e fevereiro de 2019.

A partir da análise comparativa entre os vídeos foi possível concluir que no trecho situado entre as estacas 3+20,00 a 10+10,00 aproximadamente, se encontram os principais registros de anomalias, como a identificação de arraste de materiais, quebra

de parte do concreto das manilhas, desgaste por abrasão, entre outras ocorrências. Ainda, foi possível verificar que pontualmente aconteceram novas quebras e crescimento dos buracos.

A Figura 11 ilustra a análise comparativa entre a campanha de investigação de 2018 e a campanha mais recente realizada em fevereiro de 2021 em dois trechos. No primeiro, entre as estacas 4+00 e 5+0,00, é possível observar que a tubulação encontra-se integra, com pequenos danos no concreto, no entanto nas emendas é possível notar que o geotêxtil que envolvia o tubo está rasgado e foi empurrado para dentro do tubo. Nesse trecho foi notado acúmulo de material no fundo, em época de maior nível de água dentro da tubulação, e água limpa e corrente quando o nível baixava.

Já a segunda imagem comparativa, tomada entre as estacas 5+0,00 e 6+20,00, mostra o trecho com registro de concreto danificado, como quebra na parte superior da tubulação, revestimento externo aparente e ferragem exposta, além de material em deposição em processo de arraste pelo fluxo de água.

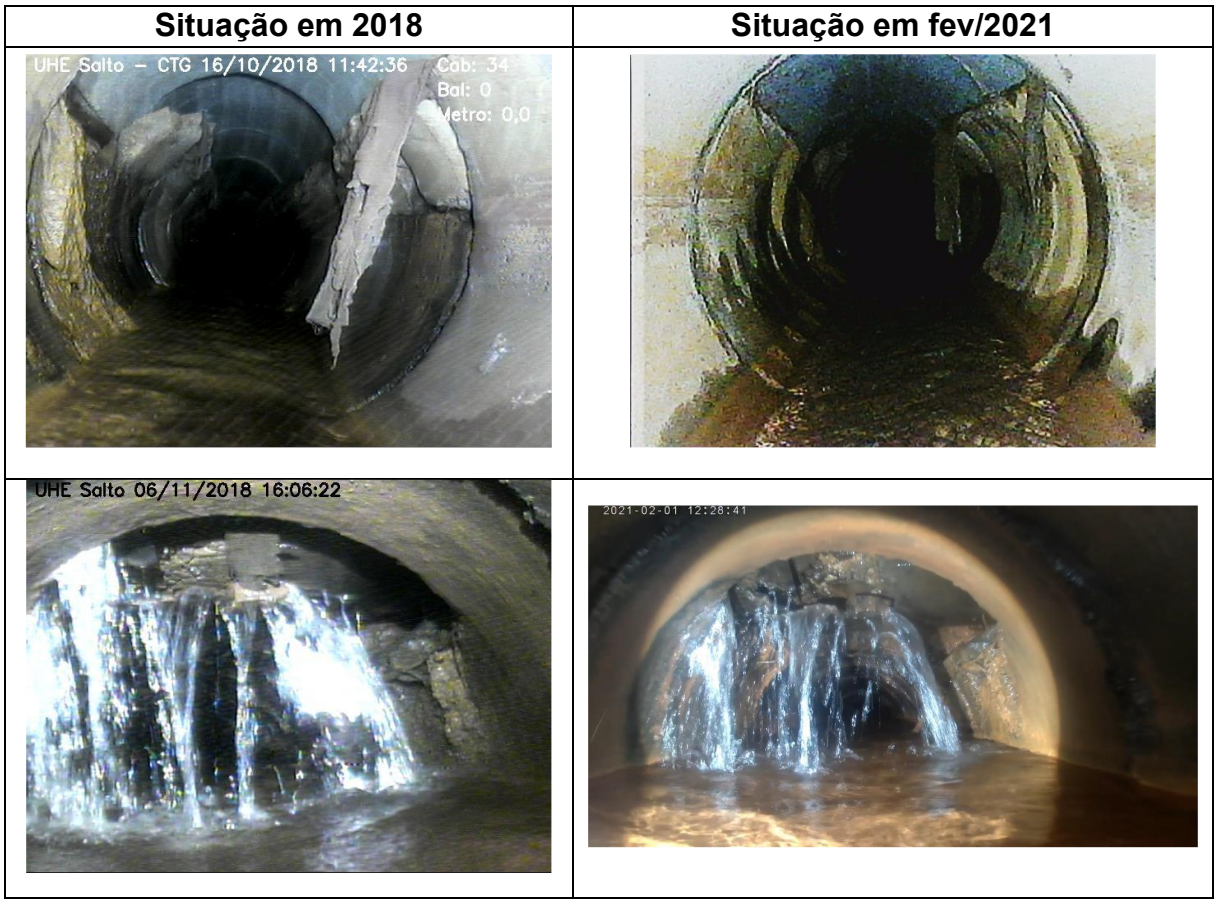


Figura 11 – Situação da tubulação de drenagem – Análise comparativa dos trechos entre as estacas 4+0,00 e 5,00 e entre as estacas 5+00 e 6+20,00

5.8. Acompanhamento dos Medidores de Vazão

Os medidores de vazão que captam as percolações que ocorrem através da barragem da margem direita, medidores MV-01 e MV-02, mostram tendência de estabilização.

Os medidores MV-01A e MV-02A, que medem a vazão que passa pela canaleta de drenagem da berma de equilíbrio da margem direita mostram variações relacionadas à sazonalidade, em que durante o período de estiagem as vazões lidas são menores.

Os gráficos apresentados na Figura 12 indicam o histórico de leituras desses instrumentos. Não se observa nenhuma mudança brusca de comportamento que possa indicar um estado anômalo de percolação de água pela fundação.

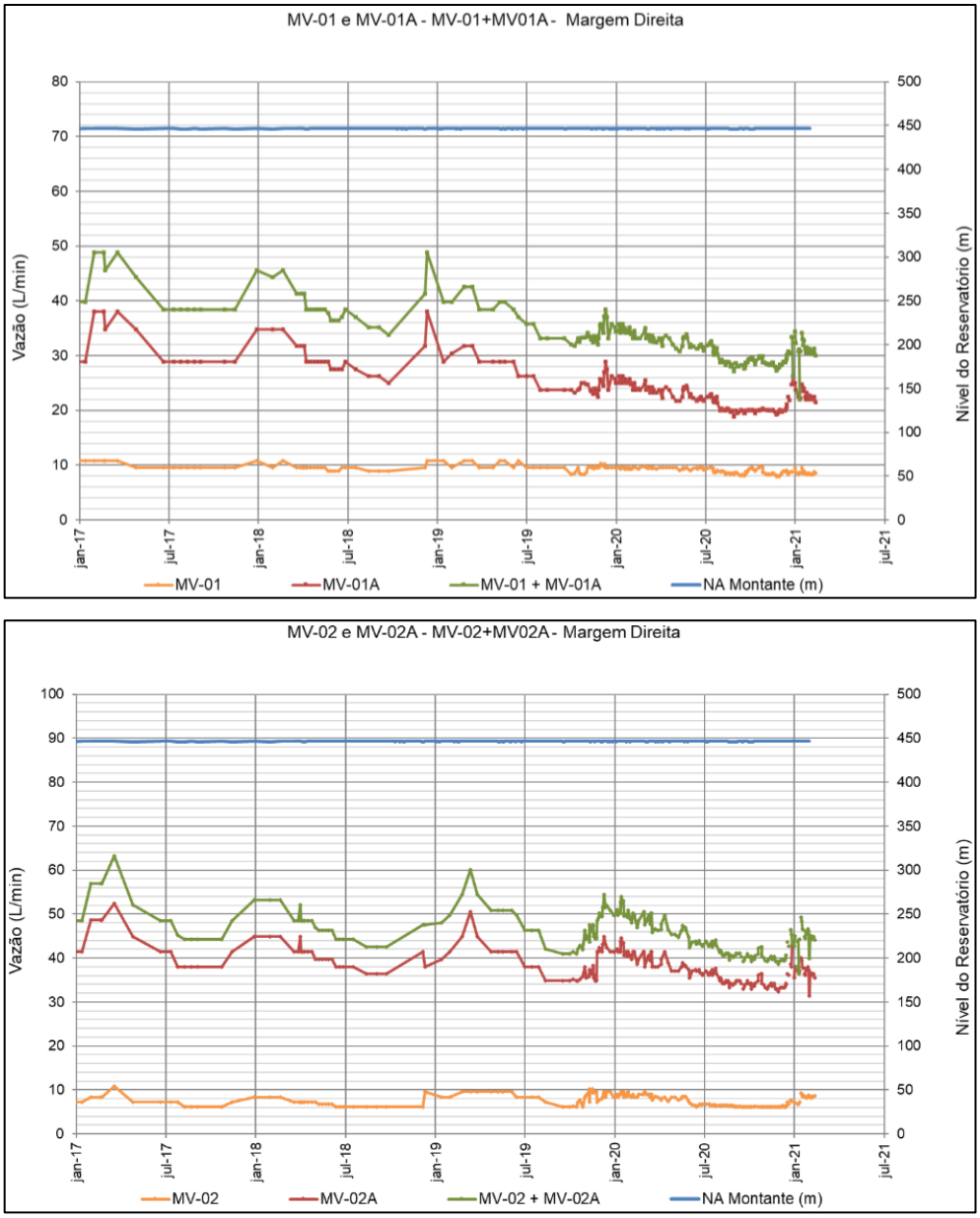


Figura 12 – Histórico das leituras dos medidores de vazão 01/01A e 02/02A

5.9. Acompanhamento do Volume de Material Carreado

A Figura 13 apresenta o histórico das medidas de volume de material coletado na caixa dos medidores de vazão. A coleta de material acumulado na caixa dos medidores vem seguindo uma frequência de duas leituras mensais, conforme recomendado.

Os dados do histórico apontam que o volume de material coletado no medidor MV-01A eram, em geral, pequenos. No entanto, houve uma elevação abrupta do volume coletado no início de fevereiro de 2021. Nessa data o material retido na caixa do medidor totalizou 104 l. Após a coleta e secagem do material, constatou-se que o material se trata de uma areia fina.

O trecho de influência do medidor de vazão MV-01A situa-se entre as estacas 1+29,00 a 10+6,55. Dessa forma, tanto o fluxo quanto o material coletado são provenientes de todo o trecho mencionado. A inspeção em ROV não indicou potenciais anomalias na tubulação que compreende o MV-01A ou alterações relevantes entre as inspeções que possam indicar a origem do diferente material visualizado.

O histórico do material coletado no MV-02A apresenta tendência semelhante, alcançando o valor máximo também no início de fevereiro de 2021 de 96 l. A inspeção por ROV não indicou mudanças relevantes no trecho tubulação que compreende o MV-02A.

O aumento do volume de material coletado e aumento das vazões registradas não refletiram nos demais instrumentos, que continuaram a apresentar suas medidas constantes.

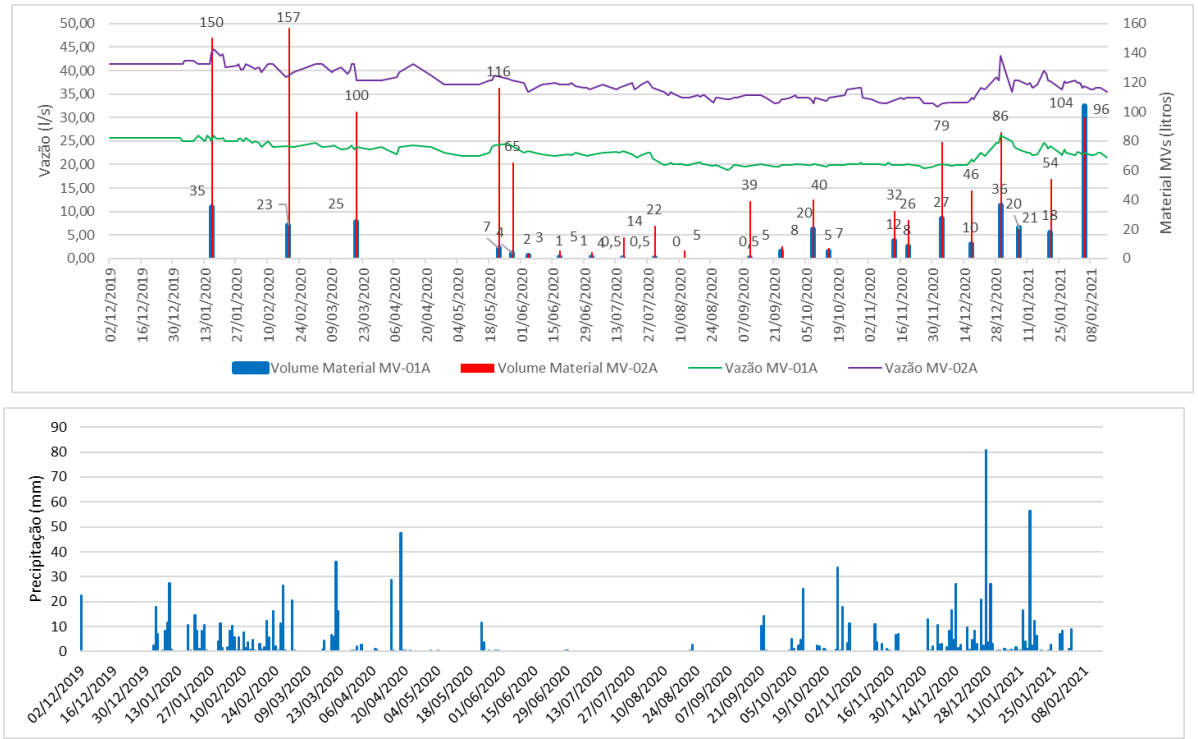


Figura 13 – Histórico de Leituras – Volume de material coletado – Medidores MV-01A e MV-02ª

6. PROJETO DE RECUPERAÇÃO

Os tipos de serviços de construção e logística a serem executados estão descritos na Especificação Técnica do Projeto (INTERTECHNE, 2020) para contratação dos serviços de recuperação da drenagem de pé do talude cujos principais aspectos estão listados a seguir:

a) Serviços gerais, mobilização e limpeza da área:

Inclui-se a mobilização dos equipamentos e mão de obra, abertura de vias de acesso internas, estabelecimento e manutenção do canteiro de obras e instalações industriais, locação e demarcação das obras, entre outros serviços. Inclui-se também o desmatamento e destocamento da área objeto das obras de recuperação assim como a limpeza e preparação das áreas de execução das obras.

b) Rebaixamento do nível freático na área de intervenção e manejo das águas;

Execução do rebaixamento do nível freático local por meio de ponteiras filtrantes, com acompanhamento da efetividade por meio de medidores de nível de água, além de sistema de esgotamento nas áreas de construção, visando executar os trabalhos sem riscos de carreamento de finos e proporcionando o lançamento adequado dos diversos materiais previstos no projeto ou através de necessidades que se observe durante a realização dos trabalhos.

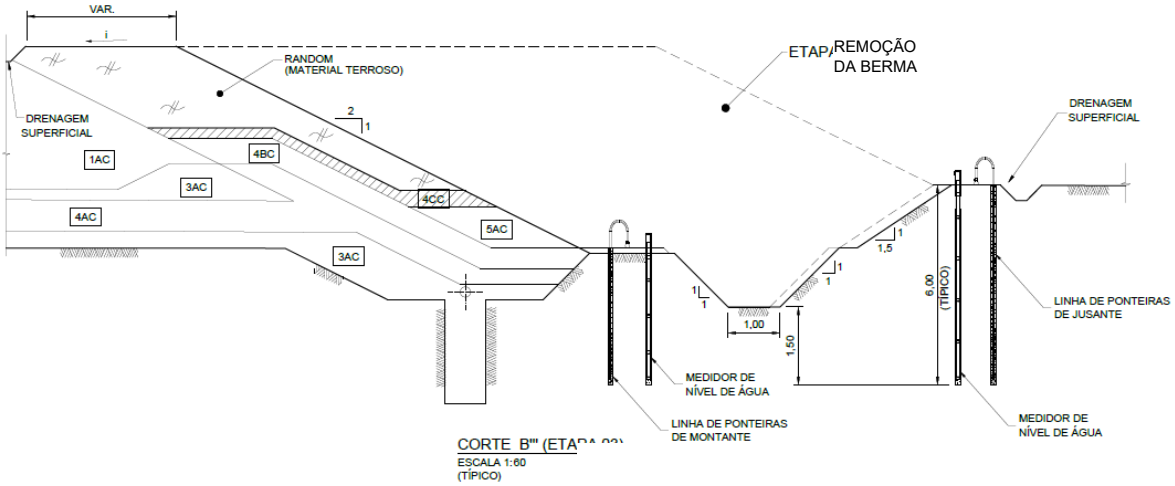


Figura 14 – Esquema de rebaixamento do nível freático com duas linhas de ponteiras filtrantes

c) Planejamento das escavações, estoque e bota-fora;

Inclui-se o planejamento das pilhas de estoque e áreas de bota-fora e a escavação da berma de equilíbrio e da região da trincheira incluindo os materiais de construção para filtro, transições e enrocamento, remoção da canaleta de concreto e tubo drenante de concreto perfurado.

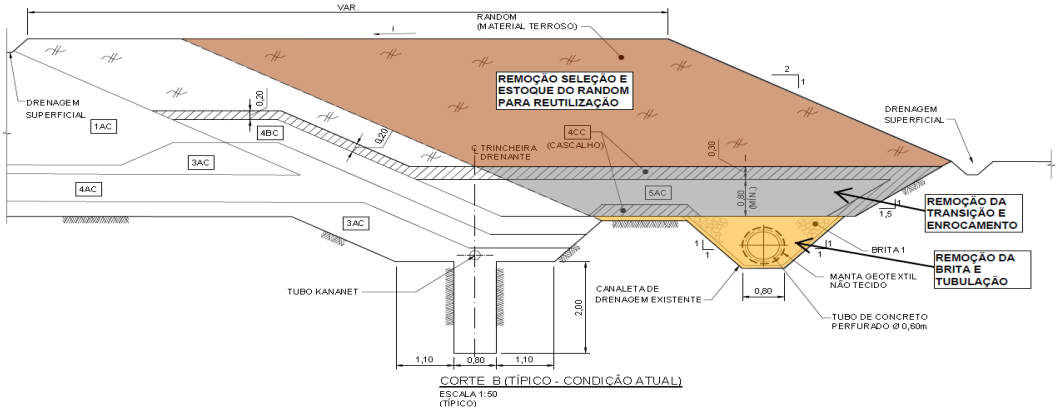


Figura 15 – Materiais a serem removidos para substituição do tubo concreto na canaleta de drenagem

d) Substituição do sistema de drenagem de pé por tubos de PEAD;

Aquisição do tubo de PEAD especificado ou similar, desde que aprovado pela projetista, e relação das atividades para instalação e montagem do mesmo.

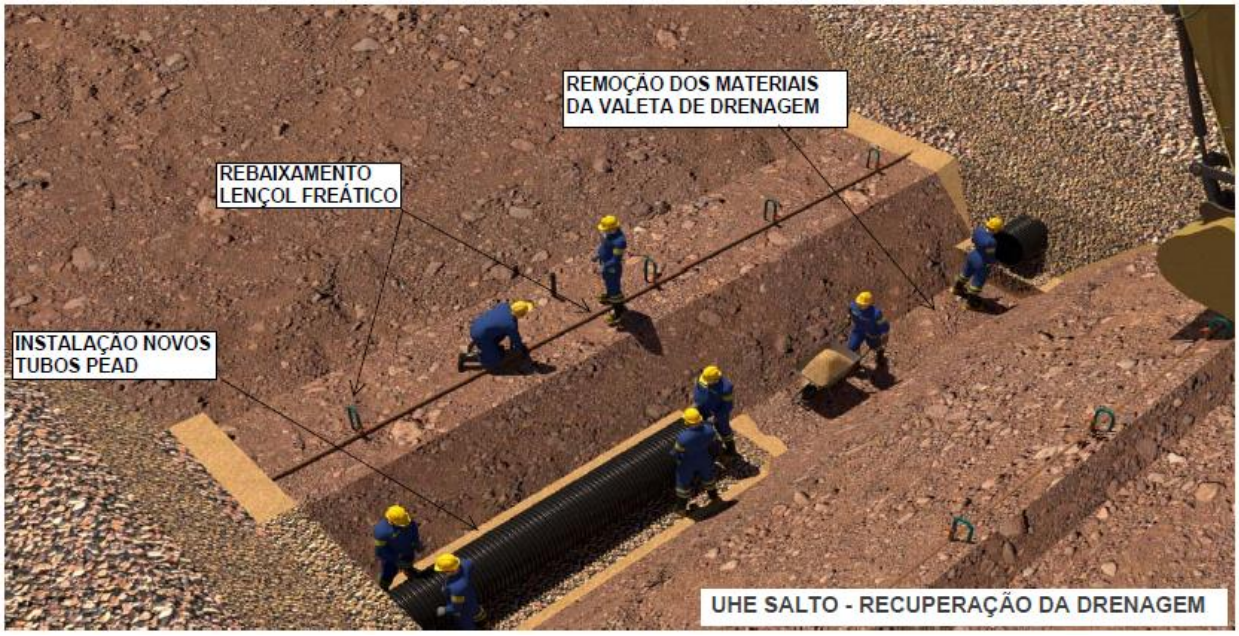


Figura 16 – Ilustração da célula escavada e instalação de tubo de PEAD sobre berço de brita e areia

e) Recomposição do aterro compactado da berma de equilíbrio;

Inclui-se a obtenção dos materiais de construção definidos no projeto ou conforme disponibilidade local, desde que aprovada pela projetista, a recomposição do aterro da canaleta de drenagem (preenchimento inicial) e a recomposição do aterro compactado da berma de equilíbrio.

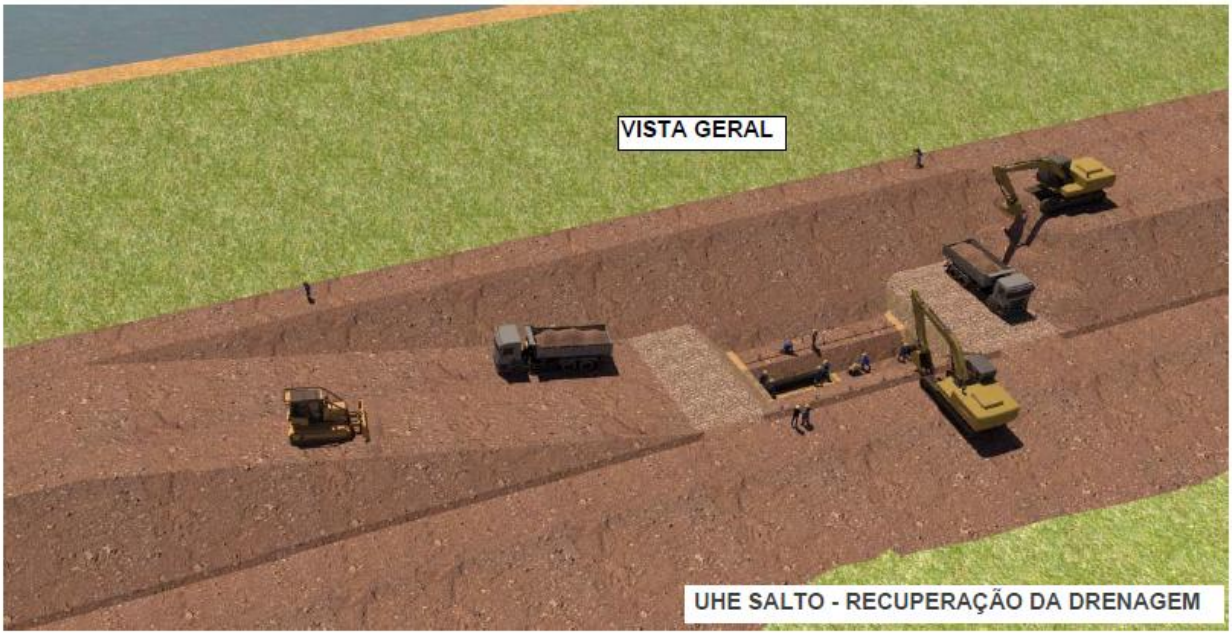


Figura 17 – Vista geral da sequência de construção

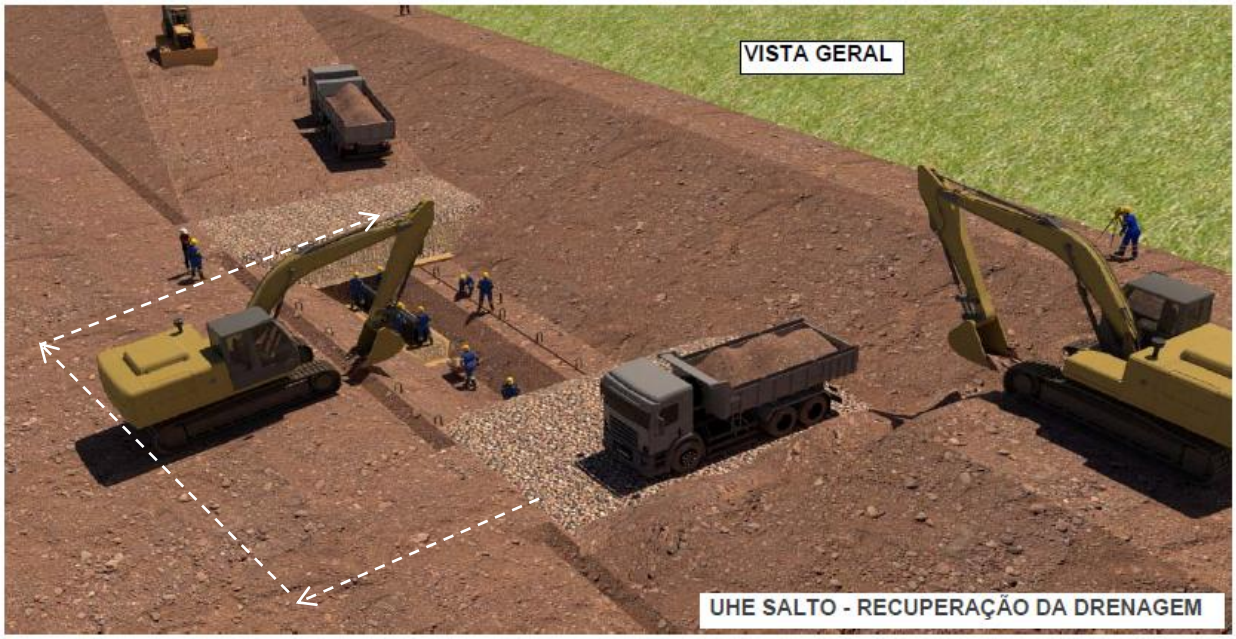


Figura 18 – Detalhe do avanço das atividades

f) Restituição da drenagem superficial e proteção dos taludes.

Restauração da proteção superficial através de plantio de grama e restituição da drenagem superficial dos taludes após a execução do aterro.

g) Instrumentação adicional

Instalação de 10 novos piezômetros permanentes e medidores de nível de água previstos no projeto de recuperação da barragem da margem direita, visando uma maior robustez do sistema de monitoramento de segurança da barragem.

7. PLANO DE CONTINGÊNCIA – REBAIXAMENTO DE EMERGÊNCIA

A concepção da usina considera que o reservatório da UHE Salto deve operar sem grandes deplecionamentos, sendo considerado como a fio d'água, mantendo o nível de água de montante na cota 446,50 m apenas com pequenas oscilações resultantes da operação da usina e variações das vazões afluentes ao reservatório.

Por esse motivo, entre outras justificativas técnicas, o projeto da seção da barragem considera que a proteção a montante com *rip-rap* se estende desde a cota da crista, 449,50m, até a cota 445,50 m.

Nesse contexto, em um cenário de emergência onde seja necessário o rebaixamento rápido do nível de água de montante para cotas inferiores à cota do rip-rap, além da estabilidade, deve ser levado em consideração questões referentes a erodibilidade do material do talude de montante quando exposto.

Neste caso, caracteriza-se como cenário de emergência, o surgimento de infiltrações e percolação de água não controlada durante a execução das obras de recuperação, que exija como medida de segurança previamente estudada o rebaixamento do nível de água do reservatório.

Para a verificação da estabilidade dos taludes da barragem de terra da margem direita durante o cenário de emergência estabelecido foram analisados quatro cenários de rebaixamento considerando diferentes vazões afluentes no reservatório.

7.1. Cenários Avaliados

Os cenários hipotéticos de rebaixamento estão apresentados na Nota Técnica NT-OO-08-2019 “Estudo do Rebaixamento Contingencial do Reservatório da UHE Salto” de maio de 2020 (documento interno) que apresenta os ritmos de rebaixamento. Os cenários consideram as vazões afluentes conforme transcritos a seguir:

- Cenário I – C1: Média correspondente aos 10% menores registros nos meses de agosto que compõem a série histórica, ou seja, 94 m³/s;
- Cenário II – C2: Afluência considerando 100% Média de Longo Termo (histórico de 1931 a 2018) da UHE Salto no mês de agosto, 118 m³/s;
- Cenário III – C3: Média correspondente aos 10% maiores registros nos meses de agosto da série histórica. 149 m³/s;
- Cenário IV – C4: Adicionalmente, será explorado um cenário sob restrição de vazão vertida máxima, limitando uma das comportas à abertura máxima de 10m. Reduzindo, portanto, a vazão vertida máxima de 1.925 m³/s para 1.760 m³/s, nesse cenário a vazão de entrada será equivalente à vazão média de longo termo (MLT) observada no mês de agosto (118 m³/s).

Dados os cenários fundamentais, a seguir é apresentada uma tabela resumo dos principais marcos e tempos medidos de rebaixamento:

Tabela 5 - Cotas medidas à cada 24h nos primeiros 7 dias no horizonte de estudo

Dias	N.A Atingido no tempo (m)			
	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV
1	443,62	443,65	443,70	443,92
2	441,51	441,57	441,66	442,00
3	439,80	439,89	440,01	440,45
4	438,43	438,54	438,69	439,17
5	437,33	437,46	437,63	438,12
6	436,44	436,60	436,79	437,26
7	435,73	435,90	436,12	436,56

7.2. Análises de Estabilidade

Todas as análises foram realizadas em termos de tensões efetivas, através do método de equilíbrio limite (método de Spencer) por meio do software Slope/W. As análises de fluxo transiente foram realizadas utilizando o método dos elementos finitos utilizando o software SEEP/W.

Em todas as seções foram pesquisadas superfícies de ruptura circular ao longo do período de rebaixamento do reservatório, sendo apresentado na Figura 19 um exemplo da condição mais crítica de rebaixamento que foi para a seção da estaca 12+50 com indicação do respectivo tempo em relação ao início do rebaixamento da cota do reservatório.

Na Tabela 6 são mostrados os fatores de segurança encontrados entre todos os cenários de rebaixamento analisados. Conforme mostrado, no intervalo de tempo de 0 a 7 dias, o ritmo rápido de rebaixamento não é suficiente para dissipação das poropressões e o corpo da barragem fica parcialmente saturado.

Em todos os casos analisados, o fator de segurança encontrado foi igual ou superior ao requerido. Com base nas seções analisadas e nos parâmetros de resistência adotados para a análise, é possível atestar a estabilidade global da barragem de terra em situação de rebaixamento contingencial do reservatório.

Tabela 6 – Cenários de Rebaixamento – Fatores de segurança por tempo decorrido

Tempo Decorrido	Margem Direita						Leito	Margem esquerda	
	Seção 01	Seção 02	Seção 04	Seção 05	Seção 07	Seção 09	Seção 10	Seção 15	Seção 19
0 h (Inicial)	2,07	2,35	2,37	2,32	2,45	2,71	2,61	2,36	2,09
1 h	2,06	2,43	2,46	2,39	2,47	2,69	2,58	2,36	2,09
2 h	2,07	2,42	2,48	2,39	2,43	2,64	2,54	2,37	2,09
3 h	2,08	2,38	2,45	2,39	2,39	2,60	2,51	2,38	2,10
4 h	2,09	2,36	2,42	2,36	2,36	2,56	2,49	2,40	2,11
6 h	2,02	2,31	2,35	2,28	2,29	2,48	2,42	2,41	2,13
8 h	1,97	2,28	2,31	2,23	2,24	2,42	2,37	2,35	2,05
11 h	1,91	2,25	2,28	2,18	2,20	2,37	2,32	2,30	1,97
14 h	1,86	2,20	2,23	2,13	2,14	2,31	2,27	2,24	1,89
18 h	1,82	2,13	2,15	2,06	2,06	2,20	2,21	2,16	1,79
1d	1,77	2,06	2,05	2,01	2,00	2,10	2,16	2,09	1,68
1d 4h	1,75	1,99	1,98	1,96	1,96	2,02	2,14	2,05	1,62
1d 10h	1,74	1,90	1,90	1,93	1,93	1,96	2,13	2,00	1,56
1d 18h	1,81	1,84	1,83	1,90	1,92	1,93	2,08	1,90	1,52
2d	1,82	1,79	1,79	1,86	1,90	1,90	2,06	1,85	1,52
2d 15h	1,84	1,68	1,68	1,74	1,84	1,85	1,99	1,72	1,58
3d	1,84	1,63	1,64	1,70	1,83	1,84	1,97	1,67	1,59
4d	1,86	1,55	1,58	1,60	1,80	1,80	1,93	1,57	1,60
5d	1,87	1,51	1,58	1,53	1,73	1,77	1,86	1,53	1,61
6d	1,88	1,49	1,59	1,48	1,68	1,75	1,81	1,54	1,62
7d	1,89	1,49	1,65	1,45	1,64	1,74	1,77	1,55	1,63

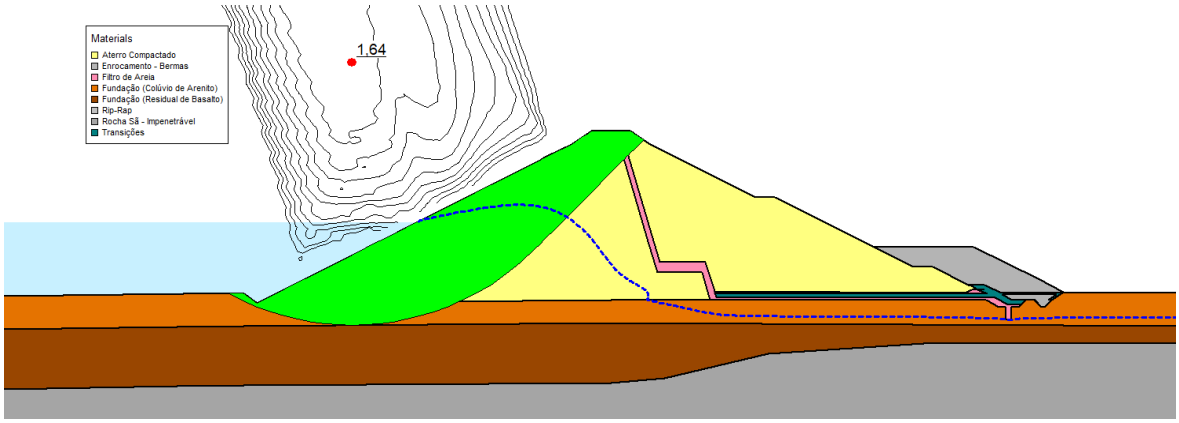


Figura 19 – Barragem MD – Condição Crítica Seção 7 (Est. 12+50,0) – Cenário I - Tempo decorrido: 7 d

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SITUAÇÃO ATUAL

O presente trabalho apresentou uma síntese dos estudos e ações realizadas para identificar e planejar as intervenções corretivas no sistema de drenagem de pé da UHE Salto com vista ao gerenciamento dos riscos. A partir do trabalho desenvolvido, a seguir apresentam-se as seguintes considerações finais.

- Destaca-se a fluxo de informação entre o profissional de campo que, a partir da detecção de um volume expressivo de material na caixa do medidor de vazão, comunicou a equipe técnica, que contratou serviços de consultoria e de investigação que culminaram no consenso de que haveria a necessidade de execução de obras de recuperação do sistema de drenagem.
- Nessa etapa foi envolvida uma equipe técnica experiente para juntos identificarem os principais riscos associados às obras, que incluem a remoção da berma de equilíbrio de exposição da barragem a fatores de segurança inferiores aos de projeto, resultando, entre outras ações, na especificação de necessidade de execução das obras em trechos pequenos, com rebaixamento do nível freático e com material de contingência à disposição.
- As ações de intensificação do monitoramento trouxeram segurança para as equipes envolvidas no sentido de que a velocidade de evolução da degradação do sistema foi compatível com o tempo de planejamento para execução das obras, de modo que as obras puderam ser iniciadas no tempo certo;
- A partir das ações de monitoramento em andamento foi possível desenvolver com detalhe o projeto de recuperação, que consiste em atividades de escavação, rebaixamento do nível freático, substituição da tubulação de concreto danificada por tudo de PEAD perfurado, recomposição da berma de equilíbrio e instalação de instrumentação permanente adicional;
- Como verificação adicional, incluída do plano de contingência, foram realizadas análises de estabilidade para os cenários de rebaixamento contingencial indicados pela equipe de operação. Os resultados indicam que o talude de montante atende aos critérios de aceitação quanto a estabilidade global dos taludes, com fatores de segurança acima do mínimo necessário. No entanto, vale ressaltar que, em caso de rebaixamento do reservatório, o nível de água à montante estará situado abaixo da cota do enrocamento de proteção. Dessa forma, o solo compactado da barragem ficará exposto e suscetível a processos erosivos, pela ação de ondas e ventos, que podem acarretar no carreamento do material e escorregamentos localizados.
- Com a execução das obras de recuperação do sistema de drenagem o nível de segurança da UHE Saltou passou de Atenção para Normal, e, portanto, mantem-se a frequência normal de monitoramento.
- A partir de 2021 foram automatizados instrumentos chave para o monitoramento, com periodicidade de leitura de 12 horas. Todos os medidores de vazão da margem direita e berma de equilíbrio foram incluídos na automação.
- Em relação ao resultado dos monitoramentos indicados, as estruturas vêm apresentando comportamento satisfatório, sem indícios de anomalias referente a deformações ou percolações. Os instrumentos vêm mantendo comportamento compatível com o histórico e dentro dos níveis de controle

definidos na última Revisão Periódica de Segurança, tanto os do projeto executivo quanto os novos instrumentos instalados durante as obras.

- Não foram observados indícios de carreamento de material, como a presença de finos nas caixas dos medidores de vazão, que vem apresentando variações sazonais compatíveis com o histórico e níveis de controle.
- Em 2025 foi realizada uma nova inspeção no interior do sistema de drenagem da berma de equilíbrio com uso de robô, e os resultados indicam que o sistema se mantém integro, não sendo identificadas falhas nas tubulações, indícios de obstruções ou carreamento de material.
- A conclusão da última Revisão Periódica realizada em 2025 foi que as estruturas apresentam comportamento satisfatório e todos os fatores de segurança obtidos atendem ao mínimo exigido pelo Critério de Projeto da Eletrobrás.

9. PALAVRAS-CHAVE

Gestão de riscos; monitoramento, erosão interna, segurança de barragens

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ICOLD - International Commission On Large Dams. **Dam Failures Statistical Analysis. Bulletin 99**, 1995.

[2] ICOLD - International Commission On Large Dams. **World Dam Register 1988**. 1998.

[3] INTERTECHNE CONSULTORES S.A. **Projeto de Recuperação do Sistema de Drenagem da UHE Salto.** Curitiba, 2020.

	**Luan Rodrigo de ALMEIDA SOUZA** Engenheiro civil e mestre pela UFPR, atua como coordenador técnico, engenheiro geotécnico e engenheiro de segurança de barragens. Experiência profissional em estudos de viabilidade, projetos básicos e executivo, e engenharia do proprietário de usinas hidrelétricas no Brasil e exterior.
	**Alex Martins CALCINA** Engenheiro Civil, graduado em 1987 pela IEEP-SP, com especialização em geotecnia. Trabalha com projetos de barragens há 35 anos, tendo participado de mais de 30 projetos de barragens no Brasil e no exterior.
	**Rodrigo Miranda CARVALHO** Engenheiro Civil pela UFV, atuando como Coordenador de Engenharia Civil na CTG Brasil. Atua em Ourinhos/SP, liderando projetos de infraestrutura e manutenção de ativos de energia, com vasta experiência em gestão técnica no setor elétrico nacional.
	**Juliano de SÁ RAMOS** Engenheiro Civil formado pela UNESP, atua na CTG Brasil em Ilha Solteira/SP. Especialista em Segurança de Barragens, atua em projetos de monitoramento e manutenção de infraestrutura hidrelétrica.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3 ANÁLISE DE DADOS NO DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

INTEGRAÇÃO DO MONITORAMENTO INSTRUMENTAL E VISUAL NA GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM GANGORRA (CE)

Itamara Mary Leite de Menezes TAVEIRA
Engenheira Civil, M. Sc – COGERH

Dalila Almeida do NASCIMENTO
Engenheira Civil – COGERH

Rafael Mota de OLIVEIRA
Geólogo, Dr. – COGERH

RESUMO

O monitoramento de poropressões e níveis d'água constitui uma etapa essencial da instrumentação de segurança de barragens. Contudo, a análise isolada de leituras momentâneas pode ocultar o comportamento real da estrutura sob diferentes solicitações hidrológicas. O presente trabalho analisou o comportamento dos instrumentos, especificamente piezômetros e indicadores de nível d'água, tendo como base os parâmetros de controle estabelecidos para a instrumentação de uma barragem sob responsabilidade da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. A metodologia consistiu na correlação entre a série histórica de quatro piezômetros e seis indicadores de nível d'água (INA) da barragem Gangorra (Granja-CE) com as classes denominadas Normal, Atenção, Alerta e Emergência. Paralelamente, realizou-se o confronto desses dados com as fichas de Inspeção de Segurança Regular (ISR) em períodos de anomalia registrada. Os resultados demostraram que a análise isolada da instrumentação pode conduzir a interpretações parciais, enquanto a avaliação combinada com o monitoramento visual reduz incertezas e otimiza a tomada de decisão gerencial. Esta abordagem integrada se mostrou fundamental para a validação dos gatilhos de segurança e para o refinamento do sistema de gestão de riscos da operadora.

ABSTRACT

Monitoring of pore pressures and water levels is an essential component of dam safety instrumentation. However, analysis based solely on instantaneous readings can obscure the true behavior of the structure under different hydrological loadings. This study evaluated the effectiveness of the control parameters established for the instrumentation—specifically piezometric elevations and groundwater table levels—of a dam overseen by the Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. The methodology consisted of correlating the historical series from four

piezometers and six dam water-level indicators (INA) at the Gangorra dam (Granja–CE) with classes labeled Normal, Attention, Alert, and Emergency. In parallel, these data were compared with the Regular Safety Inspection (ISR) records for periods when anomalies were registered. The results showed that isolated analysis of instrumentation can lead to partial interpretations, while combined evaluation with visual monitoring reduces uncertainties and optimizes managerial decision-making. This integrated approach proved essential for validating safety triggers and refining the operator's risk management system.

1. INTRODUÇÃO

As barragens de terra são elementos de importância vital na gestão de recursos hídricos na região Nordeste do Brasil, devido às condições climáticas predominantes nesta região. Entretanto, os riscos associados à eventuais falhas dessas estruturas envolvem perdas humanas e econômicas de grandes proporções.

Nesse sentido, uma das principais finalidades do sistema de instrumentação de uma barragem é acompanhar a evolução de anomalias e embasar a tomada de decisões no que tange às ações de manutenção preventiva e corretiva.

Para garantir o cumprimento dessa finalidade, o monitoramento de poropressões e níveis d'água têm papel de relevância nas barragens de terra. Contudo, a análise isolada de leituras momentâneas pode ocultar o comportamento real da barragem sob diferentes cenários, evidenciando a necessidade de abordagens mais abrangentes e integradas na avaliação de desempenho do maciço.

Assim, a coleta e interpretação de dados de instrumentação geotécnica juntamente à inspeção visual periódicas constituem uma sistemática de validação mútua, uma vez que tanto as inspeções visuais podem ser empregadas para ratificar os dados da instrumentação e até eventuais falhas, como a instrumentação pode complementar as inspeções visuais com informações a respeito do funcionamento interno da estrutura, o qual não é possível verificar apenas externamente [1, 2].

Diante disso, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise integrada dos dados de instrumentação (piezometria e nível de lençol freático) e das análises visuais realizadas em uma barragem de terra em regime operacional.

2. DESCRIÇÃO DA BARRAGEM

As informações a respeito da estrutura foram obtidas segundo o órgão empreendedor da barragem [3, 4].

Para aplicação da metodologia proposta adotou-se a Barragem Gangorra como objeto de estudo. Essa barragem é um empreendimento da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH) e está localizada no município de Granja, Estado do Ceará, a aproximadamente 339 km de Fortaleza-CE.

O eixo da estrutura está locado nas coordenadas UTM E = 293.094 m e N = 9.649.454 m, na Zona 24 M, referenciadas ao datum SIRGAS 2000, barrando o Riacho Gangorra na Bacia Hidrográfica do Coreaú. Na Figura 1 é apresentada uma fotografia aérea da Barragem Gangorra.

A barragem foi construída no período de 1997 a 1999.



Figura 1 – visão geral da Barragem Gangorra [3].

Do ponto de vista construtivo, a barragem tem altura máxima de 20,66 m e uma extensão de 1,013 m. A crista da barragem encontra-se na cota 41,0 m e possui uma largura de 6,00 m. Para garantir a integridade da estrutura, o talude de montante é protegido por enrocamento de pedra (rip-rap), apresentando uma inclinação de 1V:2,5H, enquanto o talude de jusante recebe revestimento vegetal e possui inclinação de 1V:2H.

O sistema extravasor, posicionado na ombreira esquerda, é composto por um canal escavado em rocha com soleira espessa, apresentando largura de 40,0 m e cota da soleira em 38,0 m. Complementando os sistemas hidráulicos, a tomada d'água consiste em um tubo flangeado envelopado em galeria de concreto com 53,0 m de comprimento e 800 mm de diâmetro, cujo controle de jusante é feito por meio de registro gaveta e válvula borboleta.

A barragem é constituída por um maciço de terra homogênea, material predominantemente areno argiloso, com fundação do tipo *cut-off* ao longo de toda a extensão do barramento, filtro vertical e tapete horizontal ligados ao dreno de pé. A estrutura possui capacidade de armazenamento de 54.400.000 m³ e nível d'água máximo na cota de 38 m. A seção máxima da barragem está na estaca 26 + 5,00 m, a qual está representada na Figura 2.

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros de resistência do material constituinte do maciço em diferentes estacas, à jusante da barragem.

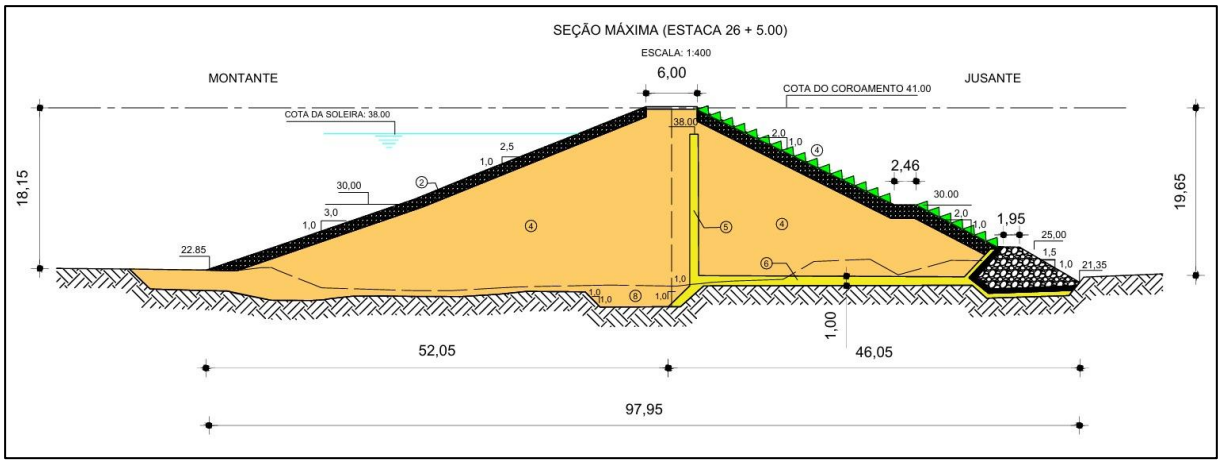


Figura 2 – estaca 26 + 5,00 m: seção máxima da barragem [4].

Tabela 1 – parâmetros de resistência do solo [5].

Estaca	Coesão efetiva (c')	Ângulo de atrito efetivo (φ')	Coeficiente de condutividade hidráulica (k)
11 + 0,00 m	20,0 kPa	33,1º	4,3E-6 cm/s
17 + 0,00 m	15,0 kPa	33,1º	6,7E-7 cm/s
27 + 0,00 m	23,0 kPa	33,1º	5,5E-6 cm/s

2.1 Sistema de monitoração

A Barragem Gangorra está inserida no Programa de Gestão de Segurança de Barragens desenvolvido pela COGERH. Este programa contempla três eixos de atuação: manutenção, monitoramento e gestão de riscos. O monitoramento da barragem é realizado através de inspeções visuais e instrumentação geotécnica. As Inspeções de Segurança Regular (ISR) ocorrem duas vezes por ano, antes e após a quadra chuvosa, e é realizado através da aplicação de um check-list padronizado que abrange todas as estruturas da barragem e suas possíveis anomalias. A barragem é instrumentada com quatro piezômetros tipo Casagrande e seis indicadores de nível d'água (NA) distribuídos em duas seções do maciço principal, todos de leitura manual, além de um medidor de vazão à jusante da descarga de fundo e réguas linimétricas. A Tabela 2 apresenta a localização dos piezômetros e a Tabela 3 apresenta a localização dos indicadores de nível d'água.

Tabela 2 – localização dos piezômetros [6].

Instrumento	Coordenadas UTM E (m)	Coordenadas UTM N (m)	Cota do topo (m)	Cota da base (m)	Profundidade (m)
Estaca 18 + 8,73 m					
PZ 19.2.1	293.081,50	9.649.583,15	36,10	20,87	15,23
PZ 19.3.1	293.095,45	9.649.581,60	30,30	24,50	5,80
Estaca 25 + 8,20 m					
PZ 26.2.1	293.073,80	9.649.433,90	36,70	22,74	13,96
PZ 26.3.1	293.088,75	9.649.443,15	30,30	19,28	11,02

Tabela 3 – localização dos indicadores de nível d'água [6].

Instrumento	Coordenadas UTM E (m)	Coordenadas UTM N (m)	Cota do topo (m)	Cota da base (m)	Profundidade (m)
Estaca 18 + 8,73 m					
NA 19.1.1	293.065,20	9.649.584,70	41,00	24,78	16,22
NA 19.2.1	293.081,50	9.649.583,15	36,10	26,06	10,04
NA 19.3.1	293.095,45	9.649.581,60	30,30	26,39	3,91
Estaca 25 + 8,20 m					
NA 26.1.1	293.058,60	9.649.444,60	41,00	35,64	5,36
NA 26.2.1	293.073,80	9.649.433,90	36,70	25,65	11,05
NA 26.3.1	293.088,75	9.649.443,15	30,30	23,98	6,32

Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas as localizações dos piezômetros e indicadores de nível d'água nas seções instrumentadas.

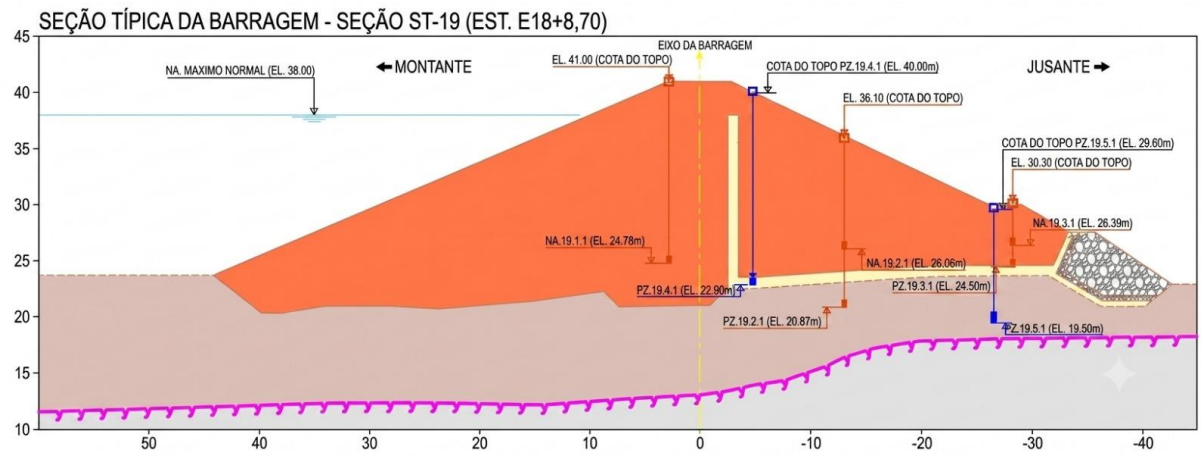


Figura 3 – seção instrumentada – EST. 18 + 8,73 m [6].

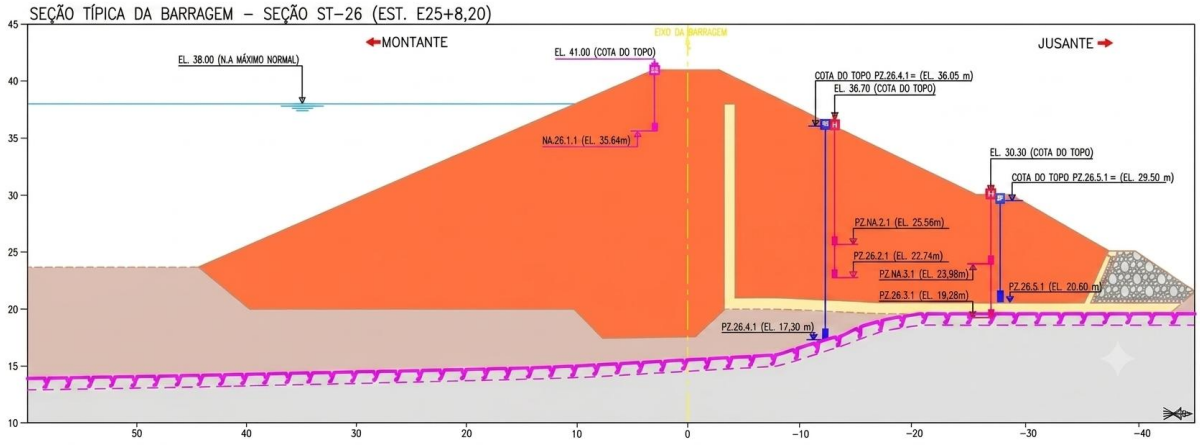


Figura 4 – seção instrumentada – EST. 25 + 8,20 m [6].

2.2 Níveis de Controle

Em consonância com o que é posto pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) [7], é possível o estabelecimento de valores de referência para os dados obtidos com os diferentes tipos de instrumentação geotécnica, de modo a viabilizar uma rápida identificação de anomalias na estrutura.

Assim, a partir das informações acerca da estrutura e das características dos materiais constituintes foram estabelecidos níveis de alerta para cada piezômetro e indicador de nível d'água de modo a correlacionar ambos com o fator de segurança (FS) global da estrutura. Os níveis denominados Normal, Atenção, Alerta e Emergência, segundo o órgão empreendedor [6] são definidos como:

> a) Nível Normal: é aquele que correspondente à situação e hipótese de funcionamento normal da barragem, com nível de água máximo normal do reservatório;
>
> b) Nível Atenção: é aquele que correspondente à ocorrência de uma anomalia que não compromete a segurança da barragem, num período de curto prazo, mas que deve ser controlada e monitorada ao longo do tempo;
>
> c) Nível Alerta: é aquele que correspondente à ocorrência de uma anomalia que traz risco para a segurança da barragem, devendo ser tomadas providências rápidas (de análise de escritório e de atividades na obra) para a eliminação do problema;
>
> d) Nível Emergência: é aquele que indica uma condição de anomalia grave da barragem considerada como uma situação que deflagra e exige cumprimento das orientações contidas no Plano de Ação Emergencial (PAE).

As classificações dos níveis de alerta em função do fator de segurança global são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – fator de segurança requerido por nível de referência [6].

Fator de referência	Fator de segurança requerido
Normal	FS ≥ 1,50
Atenção	1,30 ≤ FS < 1,50
Alerta	1,10 ≤ FS < 1,30
Emergência	FS < 1,10

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diante da relevância da temática relacionada à segurança de barragens, procedimentos como a realização de inspeções visuais e monitoramento de poropressões no interior do maciço, bem como do nível do lençol freático se consolidaram ao diagnóstico contínuo do estado dessas estruturas e à prevenção de acidentes. A seguir, busca-se apresentar os principais aspectos no que diz respeito à fundamentação desses procedimentos.

3.1 Inspeções de Segurança Regular e sua integração com a instrumentação de barragens

A segurança de barragens fundamenta-se em um conjunto integrado de práticas de monitoramento, inspeção e avaliação contínua do comportamento estrutural e hidráulico. Nesse contexto, as inspeções de segurança constituem um dos pilares do sistema de gestão, ao permitirem a observação direta das condições físicas da estrutura e de seu entorno, complementando os dados provenientes da instrumentação.

No Brasil, a Lei nº 12.334/2010 estabelece a obrigatoriedade da realização de inspeções no âmbito do Plano de Segurança da Barragem, atribuindo ao empreendedor a responsabilidade por sua execução periódica. Normativos complementares definem o conteúdo mínimo do Relatório de Inspeção de Segurança Regular (ISR) [8, 9], documento que consolida os resultados das inspeções realizadas. Destaca-se que ambos os instrumentos normativos estabelecem a obrigatoriedade de inclusão, nesse relatório, da avaliação das condições da instrumentação, bem como da análise de seus registros, evidenciando a necessidade de integração entre a instrumentação e a inspeção de campo.

A Inspeção de Segurança Regular (ISR) destaca-se como atividade rotineira voltada à identificação de anomalias visíveis e ao acompanhamento de sua evolução. Por meio da avaliação de elementos como taludes, drenagem e estruturas extravasoras, a ISR permite a detecção precoce de problemas como erosões, surgências e trincas, contribuindo para a prevenção de falhas. Sua execução, geralmente baseada em checklists padronizados, assegura maior sistematização dos registros e comparabilidade ao longo do tempo. A Inspeção de Segurança Regular é de alta relevância para identificar perigos em potencial e iminentes e definir as medidas preventivas ou corretivas a serem tomadas pelos empreendedores [10].

Na ISR as anomalias identificadas são classificadas de acordo com o Nível de Perigo, definido de acordo com as seguintes orientações da Resolução nº 236/2017 da ANA [11] alterada pela Resolução nº 121/2022 do mesmo órgão [12]: I - normal: quando determinada anomalia não compromete a segurança da barragem; II - atenção: quando determinada anomalia não compromete de imediato a segurança da barragem, mas, caso venha a progredir, pode comprometê-la, devendo ser monitorada, controlada ou reparada; III - alerta: quando determinada anomalia compromete a segurança da barragem, devendo ser tomadas providências imediatas para a sua eliminação; IV - emergência: quando determinada anomalia acarreta alta probabilidade de ocorrência de acidente ou desastre.

Apesar de sua relevância, a inspeção visual apresenta limitações, como a subjetividade do inspetor e a dificuldade de identificação de processos internos. Nesse contexto, a instrumentação exerce papel complementar ao fornecer dados quantitativos contínuos, como poropressões e níveis d'água. A integração entre essas duas abordagens possibilita a validação cruzada das informações, reduzindo incertezas e permitindo interpretações mais consistentes do comportamento da barragem.

Por fim, a análise integrada entre ISR e instrumentação é fundamental para a definição e calibração de níveis de controle e alerta, além de fortalecer a tomada de decisão. Assim, a adoção de metodologias integradas se mostra essencial para o aprimoramento da gestão da segurança de barragens, proporcionando uma avaliação mais robusta e confiável do desempenho estrutural.

3.2 Instrumentação geotécnica de barragens

O monitoramento através de piezômetros e indicadores de níveis d'água constitui uma etapa essencial da instrumentação de segurança de barragens de terra que permite, dentre outras avaliações, acompanhar o desenvolvimento de poropressões e do lençol freático durante a fase de operação da barragem.

Os principais tipos de piezômetros são: hidráulicos, pneumáticos ou elétricos. De maneira geral, a piezometria é empregada para a verificação da poropressão e podem ser usados para integrar análises de estabilidade de taludes pelo método de equilíbrio-limite, uma vez que para as análises é indispensável o conhecimento das tensões efetivas atuantes no solo, bem como pode ser aplicada também para avaliar a eficiência dos dispositivos de vedação [13].

Em paralelo a isso, os indicadores de nível d'água são utilizados para verificar diretamente a posição da superfície freática no interior do maciço, sendo empregados principalmente na mensuração do desempenho do sistema de drenagem interno da barragem.

Ambos os instrumentos podem ser empregados para a definição de níveis de alerta atrelados ao fator de segurança obtido no cálculo de estabilidade de taludes, servindo como gatilhos operacionais para os planos de operação e manutenção da gestão hídrica [16].

4. INSTRUMENTAÇÃO E INSPEÇÃO DE SEGURANÇA REGULAR DA BARRAGEM GANGORRA

Inicialmente, para o desenvolvimento deste trabalho, analisou-se a série histórica de leituras do piezômetro PZ 26.3.1 e do indicador de nível d'água NA 26.3.1, correlacionando-as com os respectivos níveis de alerta do instrumento, conforme apresentado na Tabela 4. Os dados das leituras foram disponibilizados pela COGERH, enquanto os dados a respeito da cota do reservatório foram obtidos no portal Hidrológico do Estado do Ceará [15].

Optou-se por analisar os dados do piezômetro e do INA 26.3.1 tendo em vista a sua proximidade à seção máxima e também devido às séries históricas dos demais piezômetros terem apresentado falhas e inconsistências as quais inviabilizariam uma análise mais aprofundada. Além do que, esses instrumentos foram submetidos ao teste de vida em 2024, onde os mesmos foram classificados como operantes.

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os dados referentes às leituras dos instrumentos, os respectivos níveis de alerta e o nível do reservatório ao longo do período monitorado, compreendido de 2012 a 2025.

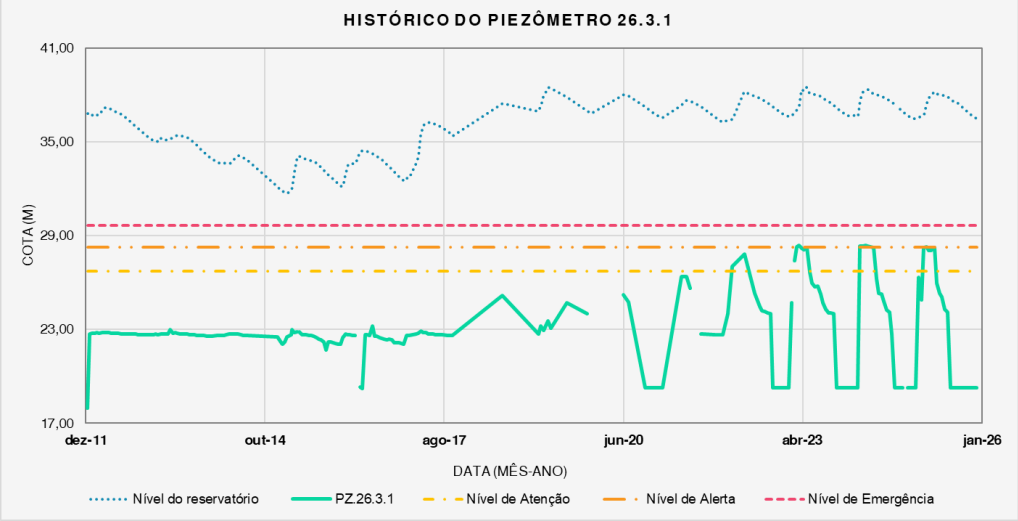


Figura 5 – cotas piezométricas: série histórica do PZ 26.3.1.

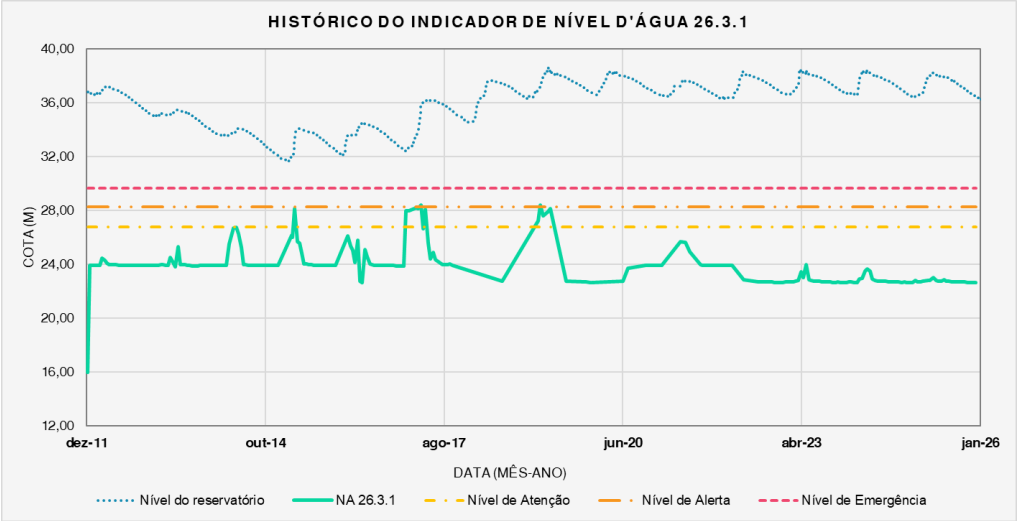


Figura 6 – cotas de nível d'água: série histórica do NA 26.3.1.

Observa-se que os valores de piezometria medidos se mantêm consistentemente abaixo dos limites críticos entre os anos de 2012 a 2022, essa estabilidade é reflexo, principalmente, da escassez hídrica ocorrida na região nos anos de 2012 à 2016 [15]. Entretanto, de 2022 a 2025 pôde-se observar que o nível das leituras realizadas frequentemente atingiu os níveis de Alerta e Atenção, numa dinâmica que acompanha a variação do nível do reservatório.

Por outro lado, com relação às leituras do INA, têm se que os níveis de Atenção e Alerta foram atingidos em 2015, 2017 e 2019. Assim como para o PZ 26.3.1, todas as ocorrências de leituras críticas do NA 26.3.1 se deram durante períodos de quadra chuvosa, enquanto as leituras do INA se mostraram estáveis nos anos seguintes.

Infere-se que não se observa reflexo desse comportamento nas leituras do INA devido à cota de base do piezômetro estar situada na fundação da barragem. Ressalta-se que as descontinuidades identificadas na Figura 5 correspondem a períodos, que por motivos técnicos, a equipe responsável não pôde realizar as leituras. Entretanto, como foram poucos pontos não coletados, essas falhas não comprometem as análises realizadas no presente trabalho.

Além disso, as oscilações verificadas no piezômetro analisado após o período de estiagem, podem ser reflexo da elevação da linha freática no interior do maciço decorrentes da percolação de águas pluviais, bem como do aumento do nível de água do reservatório, uma vez que ambas as condições contribuem para o aumento das poropressões medidas nos instrumentos.

Por fim, o comportamento do indicador do nível d'água após o período de seca, caracterizado pela atenuação das oscilações sazonais e estabilização em patamar inferior, reflete a resposta adaptativa do maciço compactado do após a estiagem. O ciclo prolongado de retração por secagem e posterior molhagem induziu o rearranjo estrutural do solo argiloso, reduzindo a condutividade hidráulica local. Esse fenômeno pode ter resultado no amortecimento da propagação da onda de carga do reservatório através do corpo da barragem, mantendo a linha freática rebaixada e estável na seção do instrumento, enquanto as pressões dinâmicas ficaram restritas ao sistema de drenagem e filtragem horizontal monitorado pelo piezômetro.

De posse dessas informações, prosseguiu-se a análise das ISR realizadas na barragem em períodos próximos àqueles em que se registraram leituras acima da faixa considerada normal de cada instrumento com a finalidade de verificar alguma tendência de comportamento.

Em um segundo momento, foram verificadas as fichas geradas nas ISR anuais realizadas no período após à quadra chuvosa. Constataram-se "sinais de fugas d'água na região a jusante do reservatório" sem carreamento de material [17], na região onde o piezômetro está instalado, de 2014 a 2025, com nível de perigo constante NP1, sem carreamento de materiais. Na Figura 7 é apresentada uma fotografia do local onde se observa o afloramento d'água e a presença de vegetação. Porém, ressalta-se que esta anomalia vem sendo monitorada pela equipe responsável e não apresenta evolução ao longo do tempo, não justificando nenhuma intervenção imediata.

Por fim, a análise combinada das informações da ISR com as leituras da instrumentação poderia elevar a classificação de risco da estrutura, de modo que as ações de manutenção e operação do responsável pela estrutura seriam melhor planejadas visando garantir uma condição operacional segura.



Figura 7 – surgência a jusante da barragem [17]

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada a análise integrada das leituras de piezometria e nível d'água e de ISR da Barragem Gangorra, o que possibilitou verificar a convergência das observações dos métodos.

A necessidade de realizar a avaliação conjunta dos dados de instrumentação e inspeções visuais se justifica pela complementação das informações sobre o funcionamento do sistema de drenagem e a dinâmica de fluxo que ocorre no maciço. Sugere-se que a análise dos dados de piezometria e nível d'água seja realizada previamente à realização da inspeção visual, de modo a possibilitar que o técnico tenha condições de maior atenção à possíveis manifestações relacionadas a problemas de drenagem interna.

O estudo de caso da Barragem Gangorra demonstrou que a análise isolada da instrumentação pode induzir a interpretações parciais. Apesar da estabilidade inicial nas leituras do piezômetro PZ 26.3.1 entre 2012 e 2022 (reflexo da escassez hídrica), os níveis de Atenção e Alerta foram frequentemente atingidos entre 2022 e 2025, acompanhando a variação do nível do reservatório. Em convergência, as Inspeções de Segurança Regular (ISR) registaram, consistentemente, de 2014 a 2025, a presença de fugas d'água a jusante, na mesma região do piezômetro. Esta correlação valida a abordagem integrada, mostrando que o monitoramento visual confirmou manifestações de anomalia (fugas d'água) em um período mais extenso do que o indicado pelas leituras instrumentais críticas, o que se revela fundamental para o refinamento do sistema de gestão de riscos da operadora.

Por fim, a análise combinada das informações da ISR com as leituras da instrumentação poderia elevar a classificação de risco da estrutura, de modo que as ações de manutenção e operação do responsável pela estrutura seriam melhor planejadas visando garantir uma condição operacional segura.

6. PALAVRAS-CHAVE

Instrumentação, Segurança de barragens, Inspeção de segurança regular, Anomalia, Piezometria.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FUSARO, T.C; FURTADO, A.S.O.; OLIVEIRA, V.R.F.; SILVA, I.T.C. (2017) – "Estruturação do manual de monitoramento como ferramenta para a segurança de barragens". Revista Brasileira de Engenharia de Barragens, ano IV, (5), p. 15-21.

[2] BRASIL. Ministério da Integração Nacional. "Manual de Segurança e Inspeção de Barragens". Brasília: Ministério da Integração Nacional. 148 p.

[3] COGERH (2026) – Acervo fotográfico.

[4] CEARÁ (2008) *apud* COGERH (2024) – "Plano de Segurança da Barragem Gangorra". Volume 1 – Informações gerais.

[5] COGERH (2026) – "Plano de análise e interpretação do comportamento da barragem". Volume 1 – Investigação geológico-geotécnica.

[6] COGERH (2026) – "Plano de análise e interpretação do comportamento da barragem". Volume 2 – Definição dos parâmetros de controle.

[7] BRASIL (2016). Agência Nacional de Águas – "Manual do empreendedor sobre segurança de barragens". Volume VII - Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens. ANA, Brasília, DF, 136 p. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/publicacoes/ManualEmpreendedor

[8] BRASIL (2022) – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Resolução nº 121, de 9 de maio de 2022. "Altera a Resolução ANA nº 236, de 30 de janeiro de 2017". Brasília. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2022/121

[9] CEARÁ (2025) – Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará. "Instrução Normativa SRH nº 01, de 10 de novembro de 2025". Disponível em: https://www.srh.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/90/2025/12/Instrucao-Normativa-e-Publicacao.pdf

[10] BRASIL (2016) – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. "Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem". Brasília.

[11] BRASIL (2017) – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. "Resolução nº 236/2017: Estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência", Anais da Política Nacional de Segurança de Barragens, Regulamentação Técnica,

v.1, Brasília, Brasil.

[12] BRASIL (2022) – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. – "Resolução nº 121/2022: Altera a Resolução nº 236/2017, estabelecendo definições e procedimentos relacionados à Política Nacional de Segurança de Barragens, incluindo conceitos de barragens desativadas, invalidadas e descomissionadas", Anais da Política Nacional de Segurança de Barragens, Regulamentação Técnica, v.1, Brasília, Brasil.

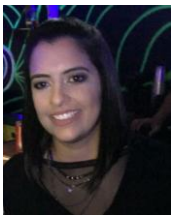
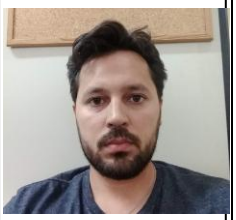
[13] SILVEIRA, J.F.A. (2006) – "Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento". 1 ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, 416 p. ISBN 978-85-8623-861-1.

[14] BRASIL (2002) – "Manual de Segurança e Inspeção de Barragens". Brasília: Ministério da Integração Nacional. 148p.

[15] CEARÁ, Governo do Estado; FUNCEME; COGERH. (2026) – "Portal Hidrológico do Ceará", recurso eletrônico disponível em: https://www.hidro.ce.gov.br, Fortaleza – Brasil.

[16] CEARÁ (2026) – Secretaria dos Recursos Hídricos. "Histórico". Disponível em: https://www.srh.ce.gov.br/historico/

[17] COGERH (2022) – "Check List de Açudes – Rotina – Barragem Bangorra".

	**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.
	**Dalila Almeida do NASCIMENTO** Engenheira civil pela Universidade Federal do Ceará. Atualmente é mestranda em engenharia civil, com área de concentração em geotecnia, pela mesma instituição. Atua como engenheira na Gerência de Segurança e Infraestrutura da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará.
	**Rafael Mota de OLIVEIRA** Geólogo pelo Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceara, 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
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

MENSURAÇÃO E AVALIAÇÃO DA PRESSÃO NEUTRA EM BARRAGENS: UM ESTUDO DE CASO

Iara MOREIRA
Engenheira de Minas - CSN Mineração

Leonardo DACIOLO
Engenharia Civil – CEFET/MG

Allan SANTOS
Engenheira de Minas - UFOP

RESUMO

O monitoramento geotécnico de barragens de rejeito é fundamental para a avaliação da estabilidade e a prevenção de acidentes associados à percolação, deformações e liquefação. Neste contexto, o presente trabalho analisa o comportamento piezométrico da Barragem Sul Inferior, localizada no estado de Minas Gerais, por meio da interpretação de dados históricos de instrumentação, da avaliação do parâmetro r_u e de análises de percolação. A estrutura é monitorada por piezômetros automatizados do tipo Casagrande com sensores de corda vibrante, utilizados para avaliação da poropressão. A metodologia contemplou revisão bibliográfica, análise estatística das leituras históricas dos instrumentos, definição de níveis de atenção, alerta e emergência com base na regra empírica 68–95–99,7, avaliação do parâmetro r_u e simulação numérica de percolação utilizando o software Slide2, da Rocscience. Os resultados demonstraram comportamento hidráulico heterogêneo entre os instrumentos, porém coerente com as condições esperadas da barragem. Os valores do parâmetro r_u apresentaram baixa amplitude e permaneceram dentro dos intervalos recomendados pela literatura. A análise numérica de percolação indicou adequada atuação do sistema de drenagem interna e boa compatibilidade entre os valores simulados e medidos em campo, com erro máximo inferior a 8%. Os resultados obtidos confirmam a confiabilidade do sistema de monitoramento e ressaltam a importância da instrumentação geotécnica na gestão da segurança de barragens.

ABSTRACT

Geotechnical monitoring of tailings dams is essential for assessing stability and preventing failures associated with seepage, deformation, and liquefaction. In this context, this study analyzes the piezometric behavior of the Barragem Sul Inferior tailings dam, located in the state of Minas Gerais, Brazil, through the interpretation of historical instrumentation data, evaluation of the r_u parameter, and seepage analyses. The structure is monitored by automated Casagrande piezometers equipped with vibrating wire sensors for pore water pressure measurement. The methodology included a literature review, statistical analysis of historical instrument readings, establishment of attention, alert, and emergency thresholds based on the

empirical 68–95–99.7 rule, evaluation of the r_u parameter, and numerical seepage simulation using Rocscience's Slide2 software. The results demonstrated heterogeneous hydraulic behavior among the instruments, consistent with the expected conditions of the dam. The r_u parameter values exhibited low variability and remained within the ranges recommended in the literature. The numerical seepage analysis indicated satisfactory performance of the internal drainage system and good agreement between simulated and field-measured values, with a maximum error below 8%. The results confirm the reliability of the monitoring system and highlight the importance of geotechnical instrumentation for tailings dam safety management.

1. INTRODUÇÃO

A instrumentação geotécnica constitui uma das principais ferramentas para o monitoramento e a segurança de barragens, permitindo acompanhar o comportamento estrutural e hidráulico dessas obras ao longo de sua operação. A partir das respostas obtidas pelos instrumentos instalados, é possível identificar alterações que possam comprometer a estabilidade da estrutura, favorecendo a detecção precoce de anomalias e a adoção de medidas preventivas. Além de contribuir para a segurança operacional, a instrumentação atende às exigências legais relacionadas à gestão de barragens, promovendo maior confiabilidade no controle e na avaliação dessas estruturas [1][2].

Nesse contexto, a definição adequada dos locais instrumentados e a correta instalação dos equipamentos são fatores essenciais para garantir a representatividade e a confiabilidade das medições. Recomenda-se que a instrumentação seja concentrada nas regiões mais solicitadas da barragem, como a maior seção transversal e áreas com anomalias geológicas na fundação, onde ocorrem maiores tensões e pressões hidrostáticas [3]. Entre os instrumentos mais utilizados destacam-se os piezômetros (PZs) e os indicadores de nível d'água (INAs), responsáveis pelo monitoramento da poropressão e da linha freática, parâmetros diretamente relacionados às condições de estabilidade da estrutura.

Os dados obtidos pela instrumentação subsidiam a definição de níveis de controle e critérios de segurança, tradicionalmente estabelecidos por meio de cartas de risco. Essas cartas associam o comportamento do nível freático e das poropressões à redução do fator de segurança da barragem, classificando as condições operacionais em faixas de normalidade, atenção, alerta e emergência [4][5]. Entretanto, estudos recentes indicam que abordagens exclusivamente determinísticas podem não representar adequadamente as condições reais observadas em campo, motivando o uso de análises estatísticas históricas para interpretação das leituras e identificação de tendências anômalas [6][7][1].

Dentre os parâmetros empregados na avaliação geotécnica, destaca-se o parâmetro r_u, capaz de definir a pressão de água nos poros em função da tensão de sobrecarga, amplamente utilizado para representar de forma simplificada as condições de poropressão em barragens e taludes [8]. Apesar de sua aplicação prática em análises de estabilidade, a adoção de valores constantes de r_u pode não refletir adequadamente a variabilidade das condições hidráulicas ao longo do maciço, tornando necessária sua calibração com base em dados de instrumentação e análises

geotécnicas mais detalhadas [8][9]. O objetivo deste estudo é analisar a distribuição das pressões neutras no maciço da barragem, a partir de dados obtidos pelas leituras dos piezômetros instalados na estrutura.

2. METODOLOGIA

2.1 Descrição da estrutura

A barragem do estudo denomina-se Sul Inferior, situada no estado de Minas Gerais. A construção desta estrutura foi em uma única etapa, com seu início de operação da na década de 80, cuja finalidade foi a contenção de água e sedimentos provenientes da barragem Sul Superior localizada a montante e materiais provenientes do entorno.

A estrutura contém um sistema de drenagem interna formado por um tapete drenante e enrocamento de saída. A barragem é monitorada por instrumentos de aferição de poropressão, logo, dispõe de 8 piezômetros do tipo Casagrande automatizados com sensores de corda vibrante. A Tabela 1 apresenta as principais informações dos piezômetros, a Figura 1 dispõe dos instrumentos localizados em campo e a Figura 2 apresenta o um esquema dos materiais que compõem a seção principal A-A', considerada de maior representatividade.

Tabela 1: Informações dos piezômetros

Instrumento	Profundidade (m)	Cota de Fundo (m)	Cota de Superfície (m)	Local de Instalação
PZ009	15,18	845,65	860,83	Fundação
PZ007	19,91	850,16	870,07	Fundação
PZ008	19,93	849,88	869,81	Fundação
PZ024	20,34	863,97	884,31	Maciço
PZ022	21,13	863,35	884,48	Maciço
PZ036	21,29	859,29	880,58	Maciço
PZ005	31,93	847,69	879,62	Fundação
PZ023	39,70	844,64	884,34	Fundação

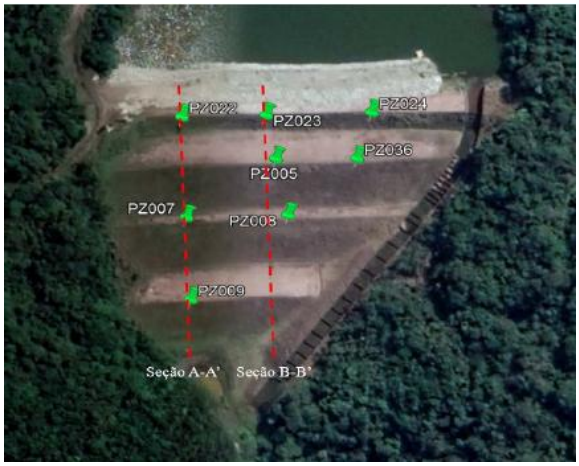


Figura 1: Seções da Barragem Sul Inferior

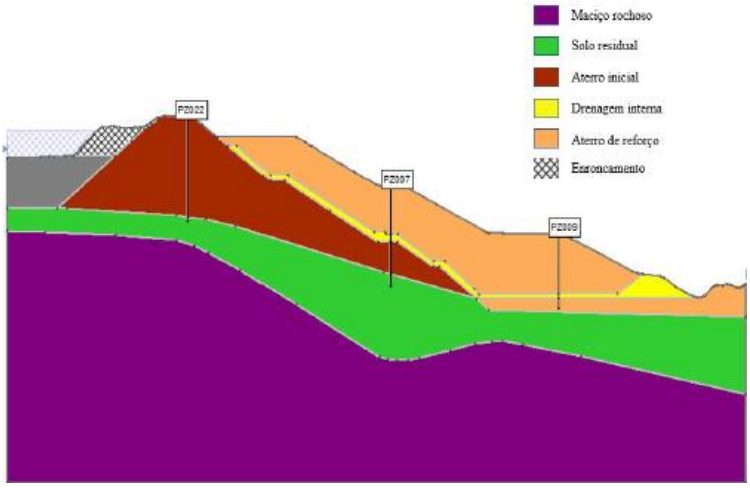


Figura 2: Seção A-A

2.2 Níveis de controle

Os níveis de controle dos piezômetros da Barragem Sul Inferior foram determinados a partir da análise estatística histórica dos instrumentos instalados na estrutura. Com base nos dados coletados, foram calculados, para cada instrumento, a média, a amplitude e o desvio padrão das leituras. Os níveis de controle foram estabelecidos segundo a regra empírica. Este método, conhecido como regra 68–95–99,7, estabelece que aproximadamente 68% dos dados se situam dentro do primeiro desvio padrão (nível de atenção), 95% dentro do segundo desvio padrão e, consequentemente, também no primeiro (nível de alerta), e 99,7% dentro do terceiro desvio padrão, englobando de forma consequente os dois anteriores [10]. Assim, os níveis de atenção, alerta e emergência foram definidos conforme as Equações 1, 2 e 3 respectivamente:

$$Atenção = \bar{x} + \sigma \quad (1)$$

$$Alerta = \bar{x} + (2\sigma) \quad (2)$$

$$Emergência = \bar{x} + (3\sigma) \quad (3)$$

A determinação dos níveis de controle por métodos estatísticos não possui um período mínimo de dados universalmente estabelecido na literatura. As diretrizes internacionais de instrumentação e monitoramento de barragens recomendam que esses limites sejam definidos a partir de um histórico representativo do comportamento normal da estrutura, considerando o tipo de barragem, o instrumento monitorado, o estágio operacional e a influência de fatores externos, como variações do nível do reservatório e a sazonalidade [11].

2.3 Dados de instrumentação

Foram elaborados gráficos da série histórica da cota piezométrica para cada instrumento, abrangendo, para o PZ036, o período de junho de 2018 a abril de 2022 e, para os demais, de janeiro de 2007 a abril de 2022.

Definido o período histórico empregado na análise, procedeu-se à avaliação das poropressões e do parâmetro r_u. Para comparar as poropressões entre instrumentos instalados em profundidades semelhantes na seção principal da barragem, adotou-se o peso específico da água igual a 10 kN/m³. A partir dos cálculos realizados, foram elaborados gráficos comparativos das poropressões entre esses instrumentos. A mesma abordagem foi aplicada ao parâmetro r_u, cujos valores foram obtidos por meio da Equação 4, que expressa a relação entre a poropressão estática (u_s) e a tensão vertical total (σ_v).

$$ru = \frac{u_s}{\sigma_v} \tag{4}$$

Complementarmente, para avaliar a influência das precipitações sobre o comportamento piezométrico observado, foram utilizados dados pluviométricos aferidos manualmente por meio de uma proveta graduada. O histórico pluviométrico compreende o período de janeiro de 2007 a abril de 2022, sendo utilizado na correlação entre os eventos de precipitação e as variações das cotas piezométricas e das poropressões registradas pelos instrumentos.

2.4 Análise de percolação

A análise de percolação foi realizada da seção A-A’ pelo software Slide2 (Rocscience Inc., Toronto, Canadá), versão 9.041 (64 bits). Após análise de percolação pelo método numérico, determinou-se qual seria o valor da poropressão nos instrumentos com os dados reais e calculou-se o erro estimado para cada piezômetro da seção principal.

3. RESULTADOS

3.1 Níveis de controle

Os níveis de controle dos piezômetros formam definidos por análise estatística dos dados históricos dos instrumentos. A Tabela 2 apresenta algumas estatísticas descritivas do banco de dados coletados ao longo do período analisado. Pode-se

verificar que embora as cotas de cada instrumento sejam diferentes, decorrente da instalação do fundo e consequente oscilação freática, a amplitude de oscilação do N.A. (diferença entre cota máxima e cota mínima de leitura) manteve-se na ordem de 1,67 a 4,88 metros ao longo da medição histórica. A partir do banco de dados, valores médios e caixas de dispersão foram determinadas, a fim de verificar frequências típicas de ocorrências de dados, conforme Figura 3. A oscilação relativa do N. A. foi determinada subtraindo a cota mínima registrada de cada leitura de cota do N. A., de forma a comparar relativamente o comportamento registrado.

Tabela 2: Dados estatísticos dos piezômetros

Instrumento	Cota N. A. Mínimo (m)	Cota N. A. Máximo (m)	Média Cota N. A. (m)	Desvio Padrão	Amplitude do N. A. (m)
PZ005	853,58	858,21	856,87	1,07	4,63
PZ007	850,24	853,95	851,16	0,98	3,71
PZ008	849,90	853,90	850,24	0,45	4,01
PZ009	846,41	848,08	846,84	0,17	1,67
PZ022	866,00	869,69	868,53	0,67	3,70
PZ023	862,08	866,84	865,87	0,87	4,76
PZ024	864,28	869,16	868,69	0,35	4,88

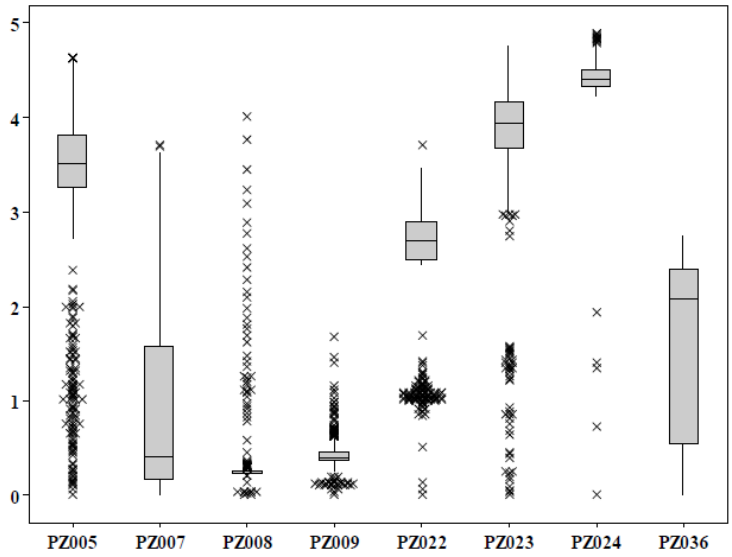


Figura 3: Dispersão da base de dados coletada

A Figura 3 evidencia leituras atípicas (*outliers*) na maioria dos piezômetros, comportamento esperado devido à extensa série histórica e às diferentes condições de operação da barragem. Predominam oscilações baixas, com *box-plots* relativamente estreitos, indicando comportamento padrão na maior parte do tempo, embora haja significativa amplitude de variação associada à heterogeneidade das poropressões. O teste de igualdade de variâncias (nível de significância de 0,05) indicou desvios padrões estatisticamente diferentes, evidenciando comportamento

hidráulico não homogêneo. Com base na metodologia estatística adotada, foram definidos os níveis de atenção, alerta e emergência, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Níveis de controle dos instrumentos da barragem

Instrumento	Atenção	Alerta	Emergência
PZ005	857,75	858,34	858,93
PZ007	851,42	852,22	853,02
PZ008	850,31	850,49	850,67
PZ009	846,91	847,02	847,14
PZ022	869,05	869,37	869,68
PZ023	866,48	866,90	867,32
PZ024	868,86	869,03	869,21
PZ036	863,68	864,64	865,60

Como os níveis de controle foram definidos por análises estatísticas, menores desvios padrão resultam em menor variação dos limites estabelecidos. Assim, os piezômetros PZ008, PZ009 e PZ024 apresentaram os menores desvios padrão, tornando-os mais sensíveis a pequenas variações da cota piezométrica. Para reduzir acionamentos indevidos, Martins (2019) [1] recomenda adotar um maior grau de confiança ou aplicar um fator multiplicador ao desvio padrão, ampliando a faixa das leituras.

3.2 Dados históricos dos piezômetros

Os gráficos de cada piezômetro ao longo de sua série histórica, com os valores da pluviometria e os níveis de controle definidos para cada instrumento pode ser visto na Figura 4 a Figura 11 a seguir.

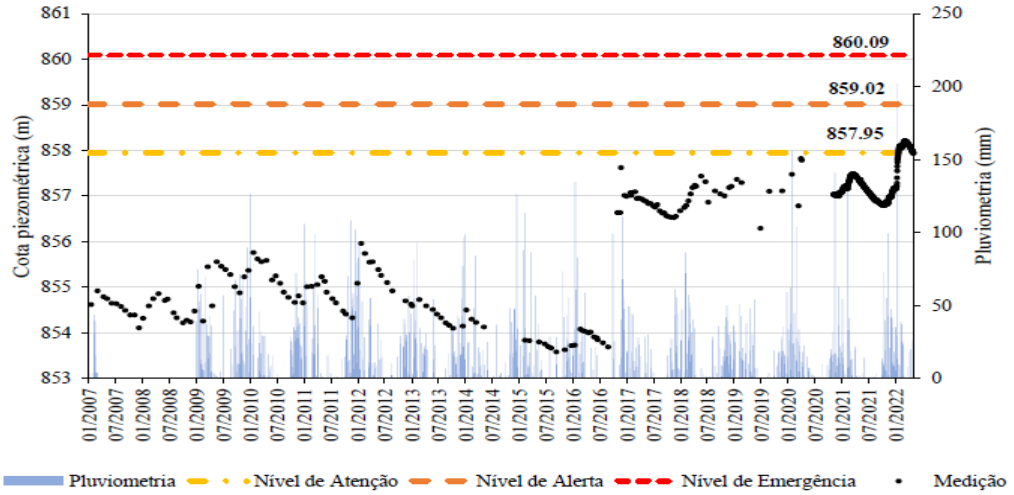


Figura 4: Gráfico histórico piezômetro PZ005

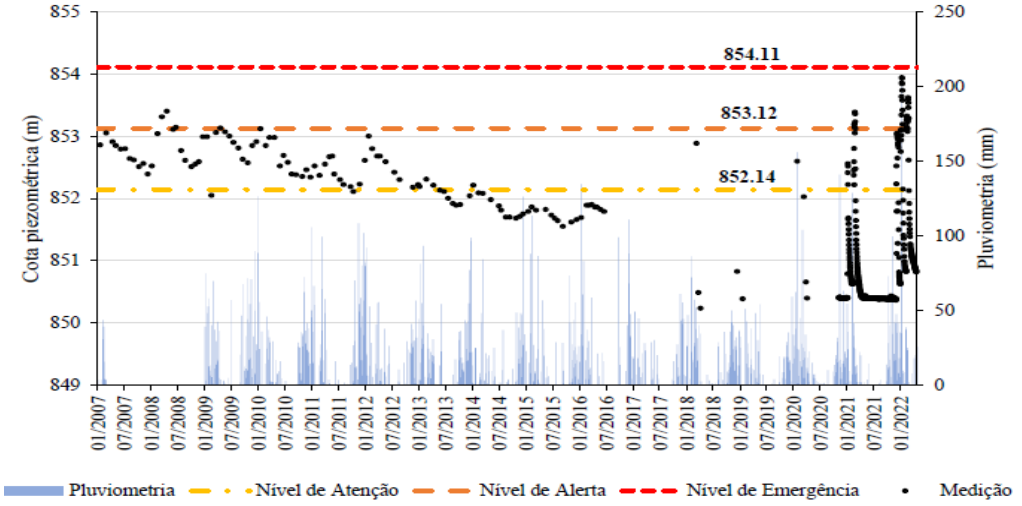


Figura 5: Gráfico histórico piezômetro PZ007

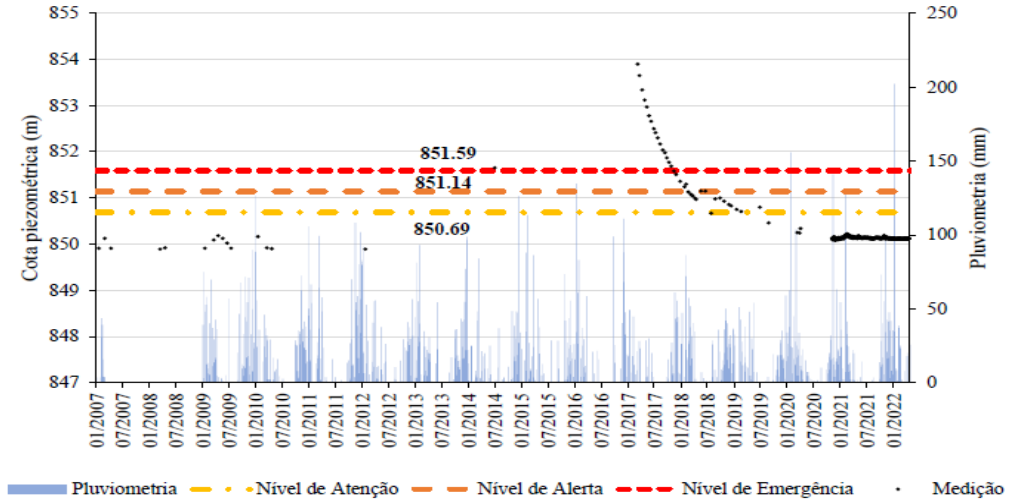


Figura 6: Gráfico histórico piezômetro PZ008

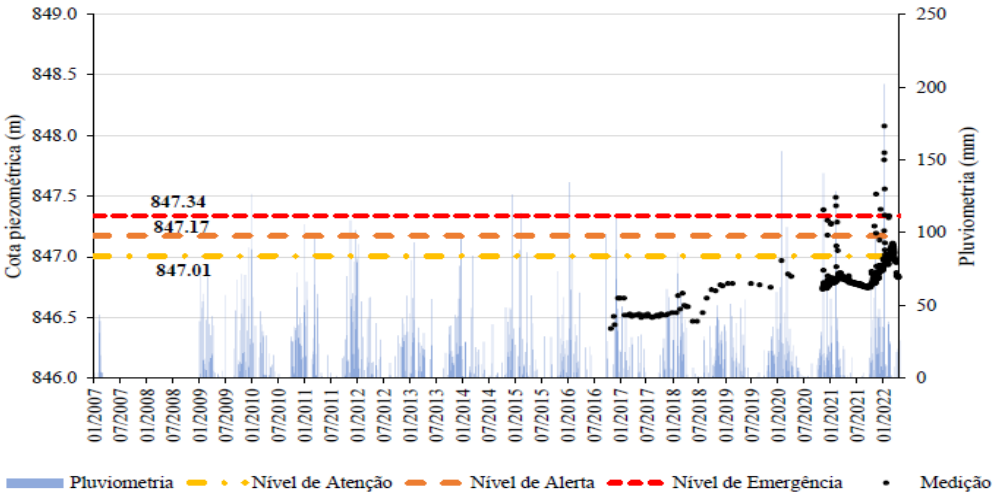


Figura 7: Gráfico histórico piezômetro PZ009

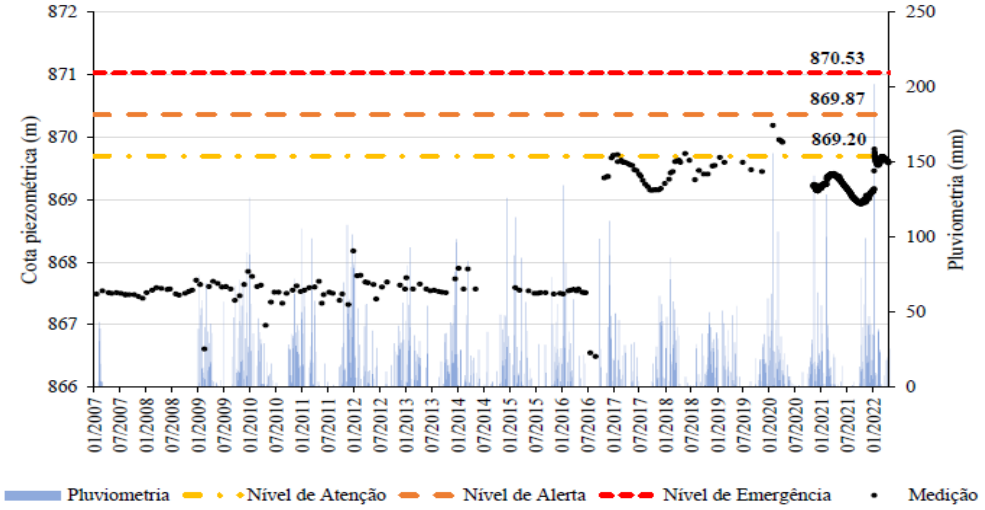


Figura 8: Gráfico histórico piezômetro PZ022

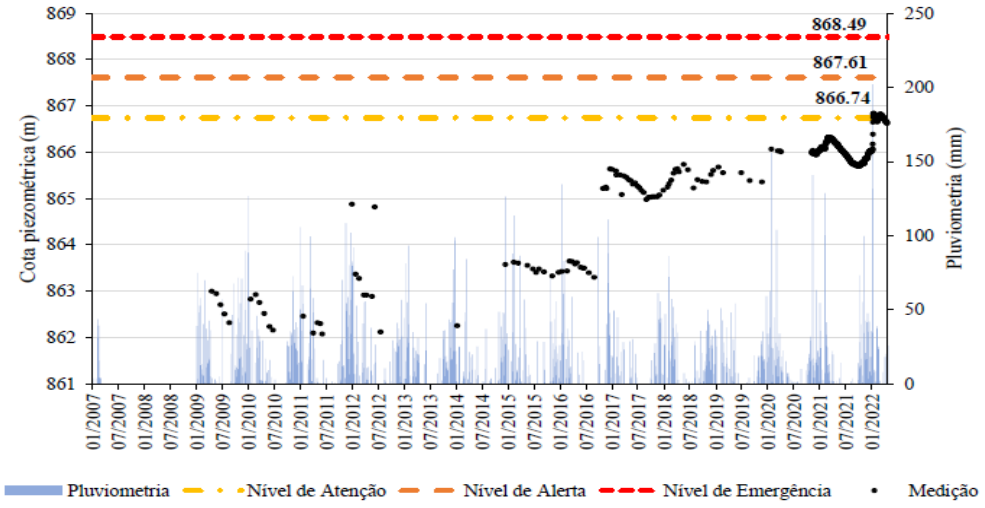


Figura 9: Gráfico histórico piezômetro PZ023

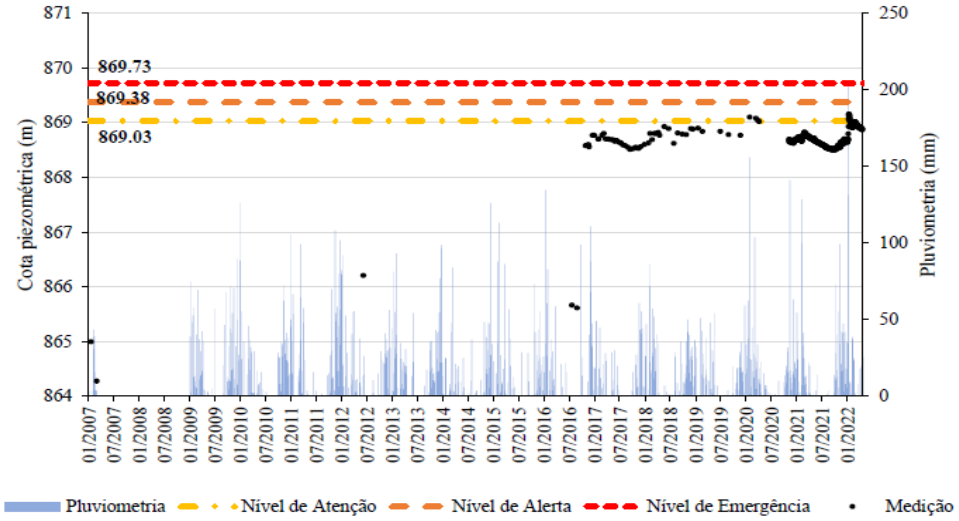


Figura 10: Gráfico histórico piezômetro PZ024

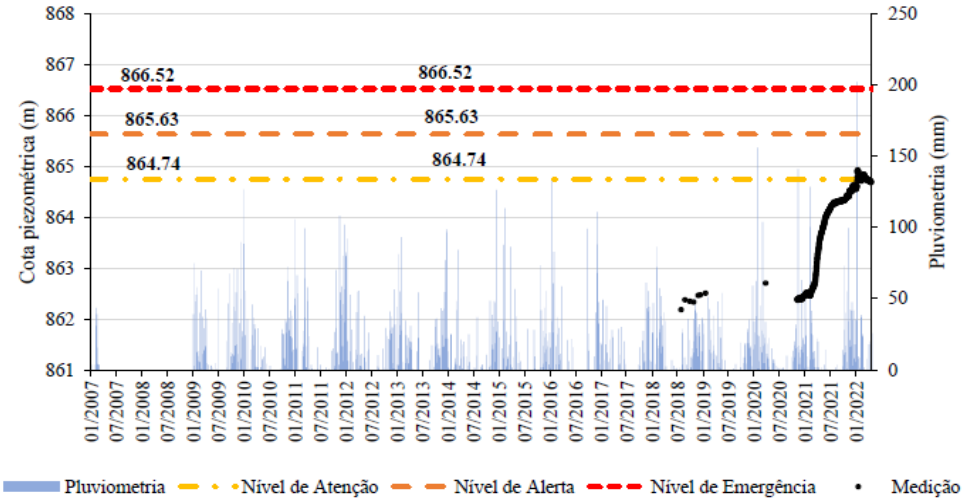


Figura 11: Gráfico histórico piezômetro PZ036

Em todos os gráficos, pode-se observar trechos discretos onde ocorrem ausência de informações pluviométricas e das medições das cotas piezométricas. Com exceção dos meses de estiagem, listam-se a seguir algumas possíveis hipóteses das lacunas informações: (1) inexistência da medição de pluviometria e de nível d'água pelo operador; (2) falta de registro dos dados geotécnicos; (3) impossibilidade de medições por condições climáticas adversas e (4) restrição de acesso à estrutura, em cumprimento a legislação vigente [12].

Percebe-se nos gráficos acima, que os níveis de controle dos piezômetros PZ008, PZ009 e PZ024 possuem pequena variação devido aos menores valores encontrados no desvio padrão. Observa-se também que todos os instrumentos da barragem apresentaram leituras acima do nível de atenção em relação a série histórica e apenas os piezômetros PZ007, PZ008, PZ009 e PZ022 registraram em algum instante a cota piezométrica acima do nível de emergência.

3.3 Variação longitudinal da poropressão no maciço

A fim de verificar o comportamento piezométrico próximo à crista do barramento, foram analisados os piezômetros PZ022 e PZ024 no período de janeiro de 2017 a abril de 2022. A poropressão foi calculada considerando a lâmina de água acima da cota de fundo do piezômetro (condição dinâmica), adotando-se peso específico da água de 10 kN/m³. A Figura 12 apresenta a comparação da poropressão entre os instrumentos PZ022 e PZ024.

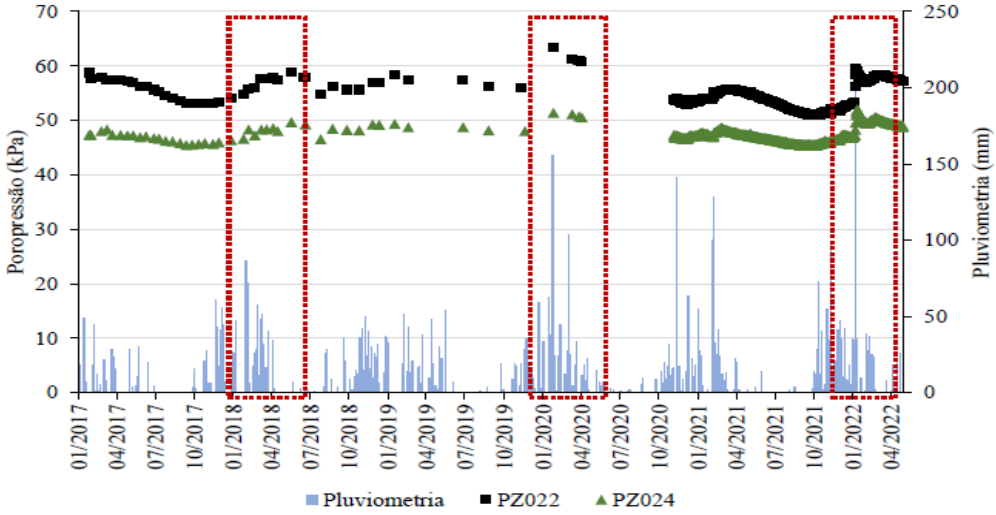


Figura 12: Comparação da poropressão dos instrumentos da crista

Os piezômetros PZ022 e PZ024, localizados na crista da estrutura, apresentaram comportamento semelhante, resultado esperado devido à pequena diferença entre suas profundidades de instalação (0,79 m). Ambos registraram poropressões elevadas por estarem próximos ao reservatório, onde a reduzida distância para dissipação da poropressão resulta em menor redução das cargas piezométricas e totais. Além disso, o sensor de corda vibrante instalado nesses instrumentos, conforme Silveira (2006) [13], possui alta precisão e sensibilidade à pressão neutra, justificando o aumento da poropressão durante o período chuvoso, entre novembro e março.

Para analisar a poropressão em função da tensão de sobrecarga, foi calculado o parâmetro r_u dos piezômetros PZ022 e PZ024 pela Equação 4. Consideraram-se espessuras de 21,13 m e 20,34 m, correspondentes à diferença entre as cotas de superfície e de fundo dos instrumentos, e peso específico de 20 kN/m³, referente ao solo do aterro do barramento. A Figura 13 apresenta a comparação dos valores de r_u, enquanto a Tabela 4 reúne a análise estatística desses instrumentos.

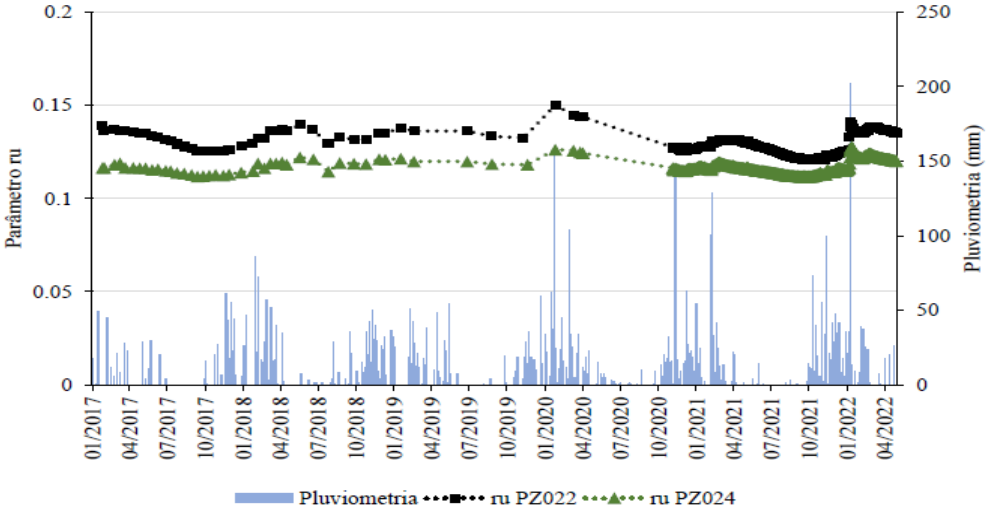


Figura 13: Comparação do r_u dos instrumentos da crista

Tabela 4: Estatística do parâmetro r_u dos piezômetros PZ022 e PZ024

Instrumento	r_u mínimo	r_u máximo	r_u médio	Desvio Padrão	Amplitude do r_u
PZ022	0,12	0,15	0,13	0,006	0,03
PZ024	0,11	0,13	0,12	0,004	0,02

A análise estatística do parâmetro r_u indica que os piezômetros PZ022 e PZ024, localizados na crista da estrutura, apresentam comportamento satisfatório, com valores máximos de r_u de 0,15 e 0,13, respectivamente, dentro do intervalo sugerido pela Rocscience (2021) [14]. Assim, os valores de r_u são considerados baixos, apresentando comportamento semelhante e baixa oscilação, mesmo durante períodos de intensa precipitação.

3.4 Variação longitudinal da poropressão na fundação

Com o intuito de analisar a distribuição da poropressão na parte longitudinal da fundação foram selecionados os instrumentos PZ007 e PZ008. Os dados dos instrumentos analisados foram do período de janeiro de 2017 a abril de 2022 e a poropressão foi calculada na condição dinâmica, empregando um valor de 10 kN/m³ para o peso específico da água. A Figura 14 apresenta a comparação da poropressão dos instrumentos PZ007 e PZ008.

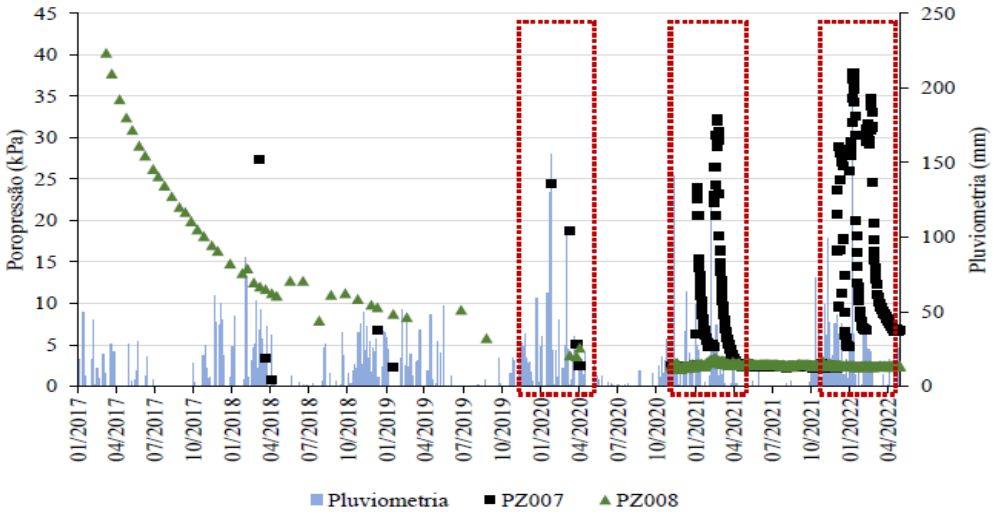


Figura 14: Comparação longitudinal da poropressão dos instrumentos da fundação

Esperava-se comportamento semelhante entre os piezômetros PZ007 e PZ008, pois ambos estão instalados na fundação, na mesma berma da barragem e com profundidades de instalação próximas. Entretanto, apenas o PZ007 apresentou resposta imediata às variações de pluviometria, enquanto o PZ008 manteve leituras constantes, mesmo em períodos chuvosos. Essa divergência sugere a necessidade

de inspeção do PZ007, especialmente quanto à integridade da vedação, cuja eventual falha pode ter influenciado as leituras.

Para complementar a análise, foi calculado o parâmetro r_u (Equação 4), utilizando espessuras de 19,91 m (PZ007) e 19,93 m (PZ008), além de peso específico de 20 kN/m³. A Figura 15 apresenta a comparação dos valores de r_u, e a Tabela 5 reúne a análise estatística dos instrumentos.

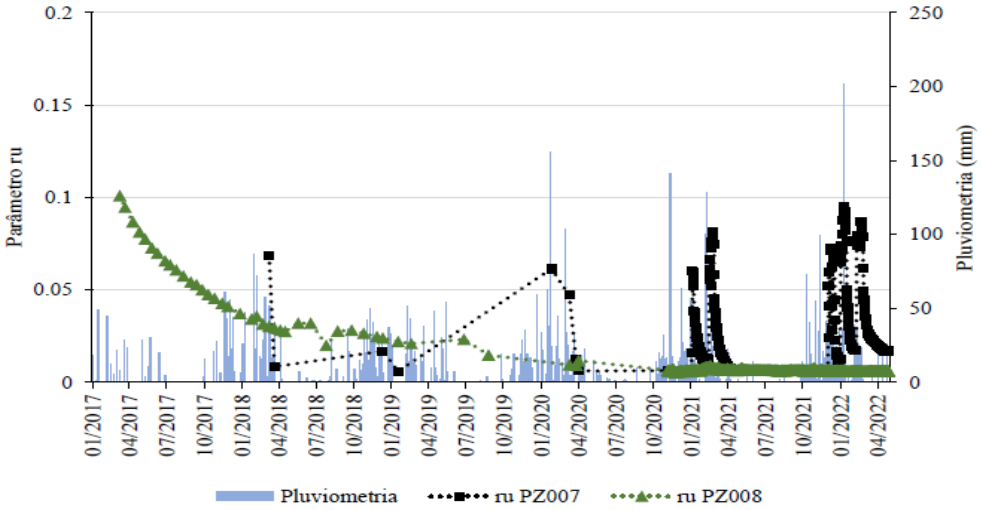


Figura 15: Comparação longitudinal do r_u dos instrumentos da fundação

Tabela 5: Estatística do parâmetro r_u dos piezômetros PZ007 e PZ008

Instrumento	r_u mínimo	r_u máximo	r_u médio	Desvio Padrão	Amplitude do r_u
PZ007	0,005	0,095	0,019	0,022	0,090
PZ008	0,005	0,101	0,009	0,011	0,096

Os valores do parâmetro r_u estão dentro da faixa estabelecida pela Rocscience (2021) [14], entre 0 e 1. A Tabela 5 também evidencia pequena variação no r_u máximo dos piezômetros, decorrente dos maiores valores registrados pelo PZ008 em 2017 em comparação ao período de março de 2021 a abril de 2022. Apesar dessa variação, é necessário investigar o comportamento dos piezômetros, validando a integridade de vedação destes instrumentos.

3.5 Variação transversal da poropressão na fundação

Para a análise da distribuição da poropressão na parte transversal da fundação, foram selecionados os piezômetros PZ009 e PZ0023. Os dados selecionados para a investigação destes instrumentos foram do período de janeiro de 2017 a abril de 2022. A Figura 16 apresenta a comparação da poropressão dos piezômetros PZ009 e PZ023.

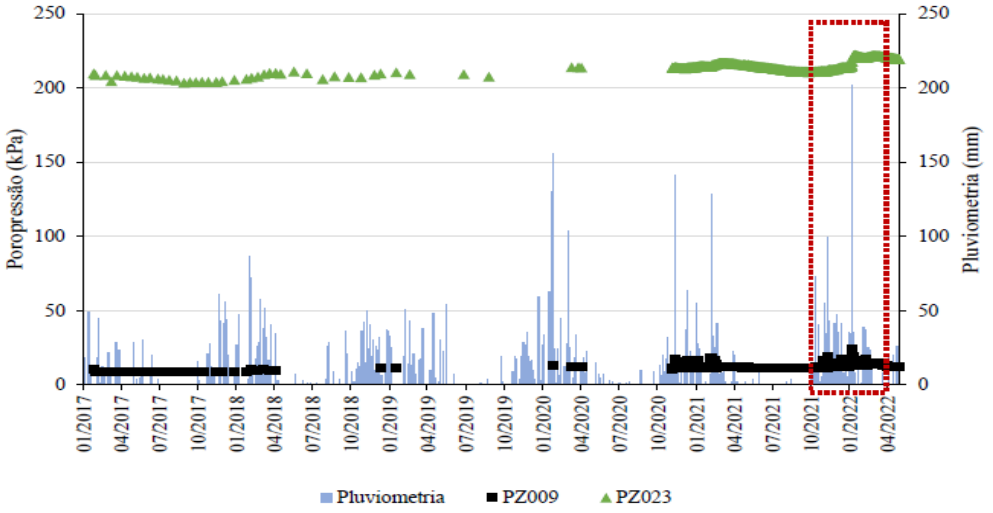


Figura 16: Comparação transversal da poropressão dos instrumentos da fundação

Observa-se diferença entre os valores de poropressão dos piezômetros PZ009 e PZ023, compatível com suas posições de instalação. Embora ambos estejam na fundação e possuam cotas de fundo semelhantes (844 e 845 m), o PZ023 está próximo ao eixo da barragem, na região da crista, enquanto o PZ009 está no pé do barramento. Ambos sofrem influência do nível do reservatório, porém a diferença de subpressão é atribuída à perda de carga ao longo do percurso de percolação na fundação, resultando em maiores poropressões no PZ023 e menores no PZ009.

O parâmetro r_u foi calculado pela Equação 4, utilizando espessuras de 15,18 m (PZ009) e 39,70 m (PZ023) e peso específico de 20 kN/m³. A Figura 17 apresenta a comparação dos valores de r_u, e a Tabela 6 reúne a análise estatística dos instrumentos.

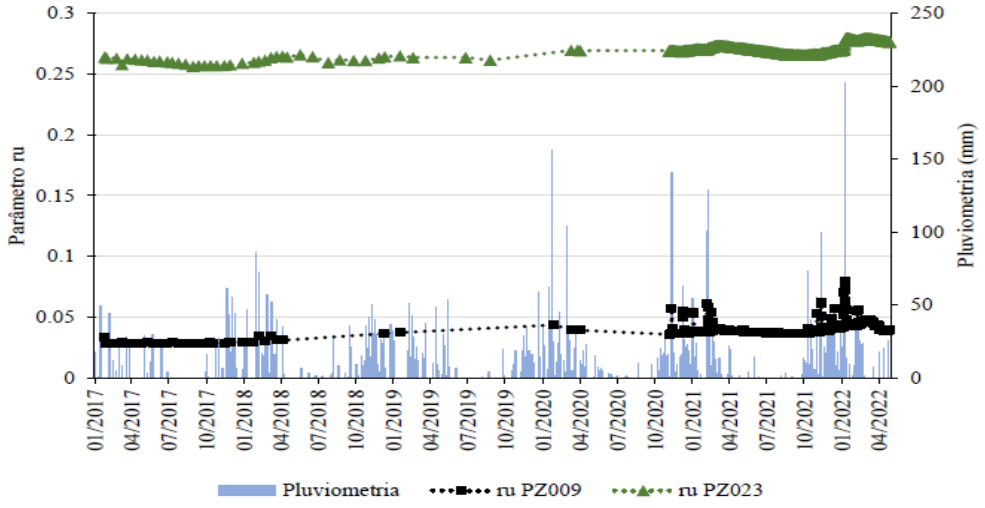


Figura 17: Comparação transversal do r_u dos instrumentos da fundação

Tabela 6: Estatística do parâmetro r_u dos piezômetros PZ009 e PZ023

Instrumento	r_u mínimo	r_u máximo	r_u médio	Desvio Padrão	Amplitude do r_u
PZ009	0,028	0,080	0,039	0,005	0,052
PZ023	0,256	0,280	0,270	0,005	0,023

Em análise, percebe-se uma pequena variação dos dados do parâmetro r_u para ambos os piezômetros e estes valores são considerados satisfatórios pois enquadram-se na variação apresentada por Rocscience (2021) [14]. Também é possível observar um certo padrão para o parâmetro, o que significa que os dados estão comportados e os valores do r_u mostrados foram conforme o esperado, sendo maior valor para o PZ023 e menor valor para o PZ009.

3.6 Análise da poropressão na seção A-A'

A fim de analisar os valores da poropressão da seção principal, foram selecionados os dados dos piezômetros PZ022, PZ007 e PZ009 do período de janeiro de 2017 a abril de 2022. A Figura 18 apresenta a comparação da poropressão dos instrumentos da seção principal.

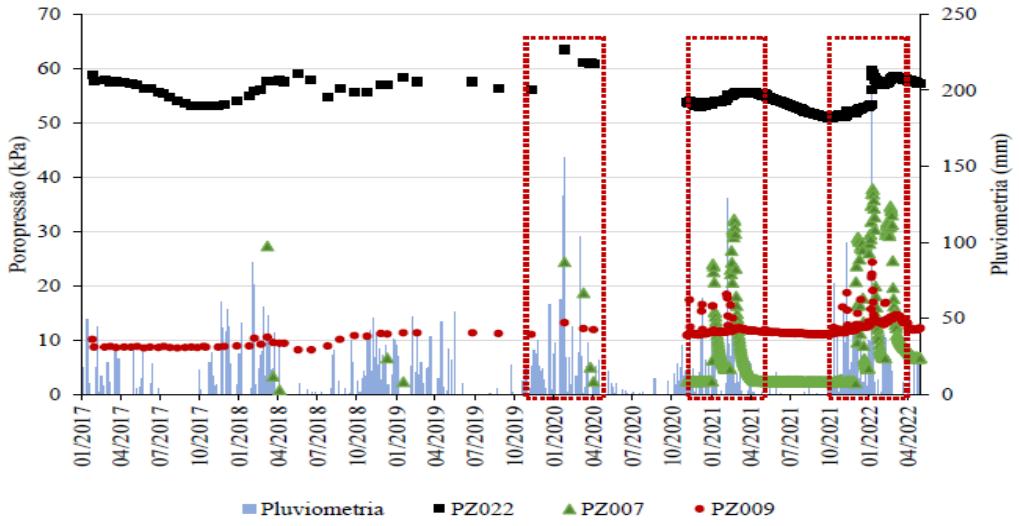


Figura 18: Comparação da poropressão dos instrumentos da seção A-A'

Os valores de poropressão registrados são compatíveis com as condições de instalação dos instrumentos. O piezômetro PZ022, próximo à crista, apresentou maiores poropressões devido à maior influência da carga hidráulica do reservatório. Já os piezômetros PZ007 e PZ009, instalados no solo residual e no aterro de reforço, apresentaram comportamentos distintos, com aumento das poropressões durante os períodos chuvosos. Essas diferenças podem estar relacionadas às características hidráulicas dos materiais e às condições locais de fluxo e drenagem, embora sua confirmação dependa de investigações complementares, como ensaios de permeabilidade e caracterização geotécnica.

Para avaliar o parâmetro r_u da seção A-A', foram realizados cálculos pela Equação 4, utilizando espessuras de 21,13 m (PZ022), 19,91 m (PZ007) e 15,18 m (PZ009), além de peso específico de 20 kN/m³. A Figura 19 apresenta a comparação dos valores de r_u, e a Tabela 7 reúne a análise estatística dos instrumentos.

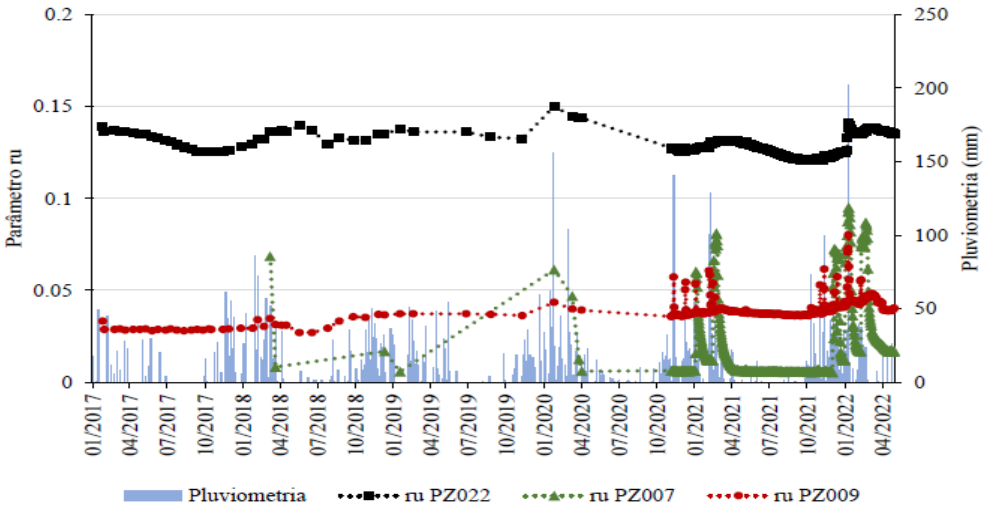


Figura 19: Comparação do r_u dos instrumentos da seção A-A'

Tabela 7: Estatística do parâmetro r_u dos piezômetros da seção A-A'

Instrumento	r_u mínimo	r_u máximo	r_u médio	Desvio Padrão	Amplitude do r_u
PZ022	0,120	0,150	0,129	0,006	0,030
PZ007	0,005	0,095	0,039	0,022	0,090
PZ009	0,027	0,080	0,039	0,005	0,053

Em análise, percebe-se que os dados dos piezômetros da seção A-A' correspondem com o intervalo de valores conforme apresentado por Rocseince (2021) [14] e os mesmos, estão coerentes com os valores esperados. A amplitude e o desvio padrão de todos os piezômetros da seção principal é baixa. Isso significa que os dados dos instrumentos PZ022, PZ009 e PZ007 são comportados e possuem um padrão com relação ao parâmetro r_u.

3.7 Análise de percolação na seção A-A'

A análise de percolação da seção principal (A–A') foi realizada a partir dos dados piezométricos obtidos nos instrumentos instalados ao longo dessa seção. Como condição de contorno, foram adotadas as maiores cotas piezométricas registradas no histórico de monitoramento de cada instrumento, representando a situação mais crítica observada. As cargas totais consideradas foram de 869,20 m para o piezômetro PZ022, 853,86 m para o PZ007 e 847,86 m para o PZ009. Esses valores correspondem às leituras registradas em 08 de janeiro de 2022, data em que foi observada precipitação acumulada de 202,06 mm. A linha freática obtida na simulação é apresentada na Figura 20.

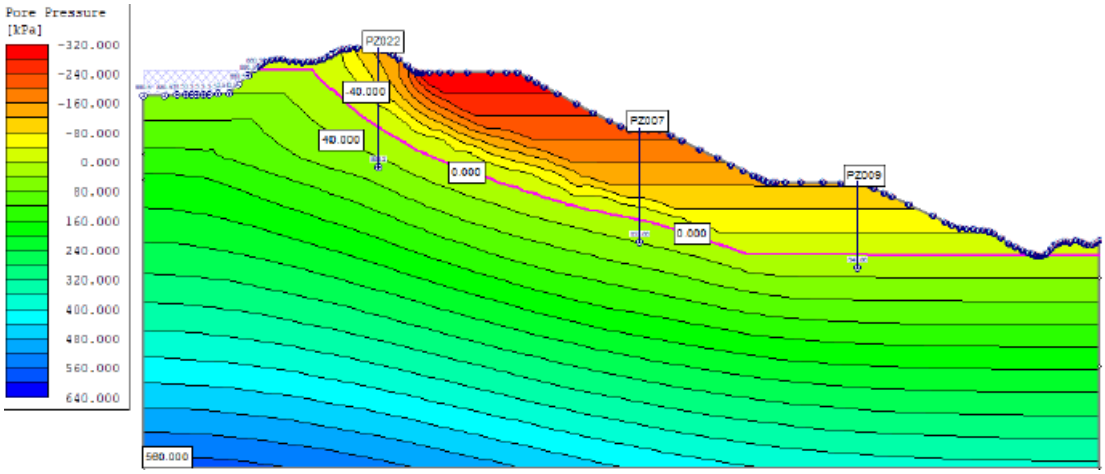


Figura 20: Linha freática da seção A-A'

Analisando os resultados, observam-se as isolinhas de poropressão e a linha freática, que se estende do reservatório até o ponto de saída no maciço, evidenciando o adequado desempenho do sistema de drenagem interna do aterro de reforço, composto pelo tapete drenante e pelo dreno de pé, no controle do fluxo percolado. Na linha freática, a pressão neutra é nula (u = 0). Acima dessa superfície, ocorrem poropressões negativas devido à sucção matricial, característica da zona não saturada. Abaixo da linha freática, os poros permanecem saturados, gerando poropressões positivas que aumentam com a profundidade, atingindo aproximadamente 560 kPa na camada de maciço rochoso. Essa distribuição está de acordo com o comportamento hidráulico esperado para meios porosos parcialmente e totalmente saturados. Além disso, a configuração da linha freática e das equipotenciais apresentada na Figura 20 concorda com os resultados de Cerqueira (2017) [15], corroborando a adequada calibração do modelo de percolação quanto à representação do sistema de drenagem interna e à compatibilidade entre as cargas piezométricas simuladas e observadas em campo.

Outra análise realizada na seção principal foi a avaliação das linhas equipotenciais. Estas linhas apresentam uma forma de “S” que seguem do reservatório e percorrem toda a estrutura. A Figura 21 ilustra as linhas de fluxo equipotenciais com os instrumentos instalados na seção A-A’.

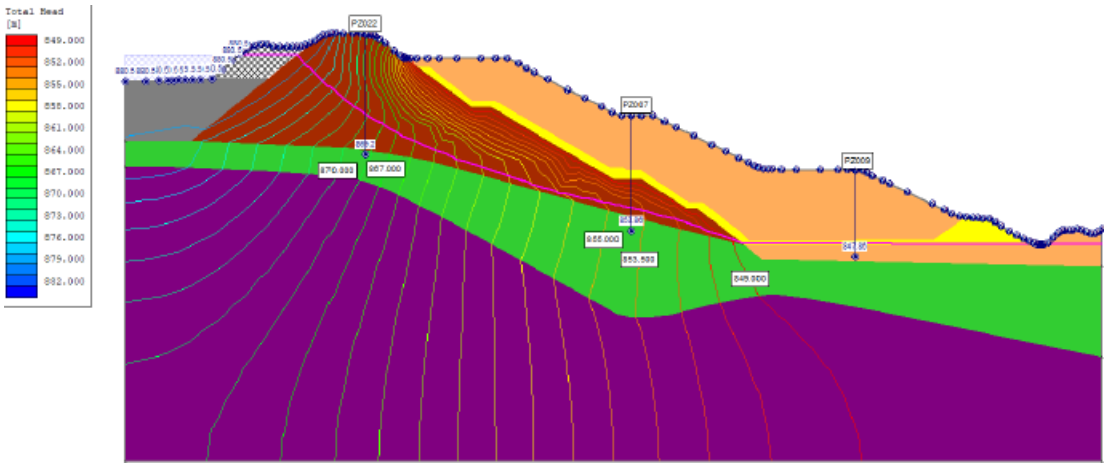


Figura 21: Equipotenciais da seção A-A'

Os valores de carga total representados pelas equipotenciais diminuem gradativamente à medida que se afastam da crista da barragem em direção ao pé de jusante. Esse comportamento ocorre em razão da perda de carga hidráulica ao longo do percurso de percolação, decorrente da dissipação de energia do fluxo ao atravessar o meio poroso. Assim, a energia hidráulica disponível é progressivamente reduzida desde o reservatório, onde a carga é máxima, até a saída do fluxo no sistema de drenagem e no pé da barragem, refletindo-se na redução dos valores de carga total representados pelas equipotenciais. Além disso, pode ser verificado que a distância das linhas equipotenciais aumenta à medida que as variações piezométricas crescem. A fim de analisar a similaridade dos valores da poropressão estimado pelo modelo com os valores registrados no real, a Tabela 8 apresenta a comparação destes valores de poropressão para cada instrumento da seção A-A’ e o erro estimado.

Tabela 8: Comparação da poropressão real e estimada

Instrumento	Poropressão real (kPa)	Poropressão estimada (kPa)	Erro estimado (%)
PZ022	58,500	59,546	1,788
PZ007	37,000	38,454	3,929
PZ009	22,100	23,837	7,859

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da análise dos piezômetros da Barragem Sul Inferior indicaram estabilidade geral do comportamento piezométrico, apesar da heterogeneidade hidráulica entre os instrumentos. A partir de janeiro de 2017, observou-se uma ascensão das cotas piezométricas na maior parte dos históricos, sem evidências de condições críticas de percolação. Os piezômetros PZ008, PZ009 e PZ024 apresentaram maior sensibilidade às variações das condições hidráulicas, enquanto os PZ007 e PZ008 exibiram comportamento descendente seguido de leituras inconsistentes, indicando a necessidade de investigações complementares sobre o funcionamento dos instrumentos e a permeabilidade da região de instalação.

Embora alguns piezômetros tenham registrado valores acima dos níveis de controle, a análise integrada das leituras, do parâmetro r_u e da modelagem numérica confirmou que as pressões neutras permaneceram compatíveis com a condição operacional da barragem. O modelo apresentou erro máximo de 7,28% entre os valores simulados e observados, demonstrando boa representatividade do regime de percolação. Em conjunto, os resultados indicam que as condições de percolação permanecem controladas, contribuindo para a manutenção da estabilidade da barragem e reforçando a importância do monitoramento piezométrico na prevenção de problemas relacionados à percolação, deformações e liquefação.

5. PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento Geotécnico; Barragem, Poropressão e Percolação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MARTINS, T. A. (2019) - Valores de controle para instrumentação em barragens de rejeito. Monografia (Especialização em Engenharia e Tecnologia de Barragens) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

[2] VIEIRA, M. F.; LOPES, D. J. de S.; NETO, A. F. L.; BAYMA, R. S. (2017) - Influência do lago da UHE Tucuruí sobre a barragem de concreto: um estudo de caso sobre os MTJ's. *Revista CIATEC – UPF*, v. 9, n. 1, p. 1–14.

[3] SANTOS, L. C. (2019) - Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

[4] VELTEN, R. Z. et al. (2016) - Proposição de metodologia para a elaboração de carta de risco de barragens de terra e terra-enrocamento. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte.

[5] SOUZA, T. C. de. (2018) - Metodologia de avaliação de liquefação em barragens de rejeito: uma abordagem probabilística. Dissertação (Mestrado em Geotecnia em Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

[6] FUSARO, T. C. (2007) - Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: um estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

[7] LIGOCKI, L. P. (2003) - Comportamento geotécnico da barragem de Curuá-Una, Pará. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

[8] GEOSTUDIO. Stability Modeling with GeoStudio. GEO-SLOPE International, Ltd. 2021.

[9] COSTA, A. M. da. (2009) - Estudo de tensão deformação para o 3° alteamento da barragem Itabiruçu. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

[10] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.

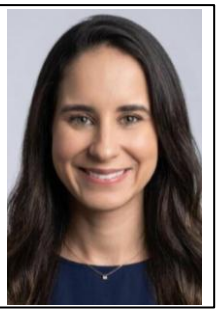
[11] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Dam Surveillance Guide. Bulletin 158. Paris: ICOLD, 2010.

[12] Agência Nacional de Mineração (2021). Portaria DNPM nº 70.389: Segurança de Barragens. Brasília. Disponível em: gov.br/anm.

[13] SILVEIRA, J. F. A. (2026) - Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos.

[14] Rocscience. (2004) - Slide 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes: User's Guide. Part 3. Toront.

[15] CERQUEIRA, H. (2017) - Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto

	**Iara MOREIRA** Engenheira de Minas formada pelo CEFET e pós-graduada pelo Instituto Minere em Geotecnia e Segurança de Barragens e Pilhas de Mineração, com experiência em monitoramento de estruturas, estabilidade de taludes, gestão e gerenciamento de riscos geotécnicos.
	**Leonardo DACIOLO** Doutorando em Engenharia Civil (Geotécnica) pela Queen's University e cursa especialização em GeoEngenharia pela mesma instituição. Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São Carlos (2017) e Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São Carlos (2020).
	**Allan SANTOS** Doutor em Engenharia Mineral pelo PPGEM - UFOP, na área de mecânica de rochas. Graduado em Engenharia de Minas pela Universidade Federal de Ouro Preto. Tem experiência em mecânica de rochas e geoestatística. Atualmente é professor no Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

METODOLOGIA NUMÉRICA INTEGRADA À INSTRUMENTAÇÃO PARA A GESTÃO DA SEGURANÇA DE ESTRUTURAS DE GRAVIDADE EM CONCRETO

Saulo Silvestre DE CASTRO
M. Sc - Universidade Federal de Minas Gerais
Gerente Técnico - DF+ Engenharia

David Assis SOUSA
Coordenador de Projetos - DF+ Engenharia

RESUMO

Estruturas de gravidade em concreto, como vertedouros e tomadas d'água, desempenham papel relevante em barragens de geração de energia e captação de água. Sua estabilidade é influenciada por variações de subpressão na fundação, oscilações do nível d'água e condições operacionais, tornando a instrumentação essencial ao monitoramento estrutural. Para que essa instrumentação seja um indicador efetivo de segurança, é necessária a definição de níveis de controle compatíveis com o comportamento real do sistema estrutura-fundação, apoiando a gestão da segurança e a tomada de decisão operacional. Tradicionalmente, esses níveis são definidos pelo método do equilíbrio limite, que adota hipóteses simplificadoras. Este trabalho propõe uma metodologia baseada no Método dos Elementos Finitos para avaliação dos níveis de segurança de estruturas de gravidade em concreto. Para isso, é desenvolvido um modelo tridimensional no software SAP2000, capaz de representar os mecanismos estruturais e geotécnicos envolvidos. Como principal contribuição, apresenta-se uma abordagem integrada que combina modelagem numérica e automação, por meio de uma API que atualiza o modelo com dados de instrumentação, viabilizando o cálculo contínuo dos fatores de segurança e a definição dinâmica dos níveis de controle. A comparação com o método do equilíbrio limite evidencia diferenças relevantes na interpretação da segurança. Conclui-se que a metodologia proposta constitui alternativa prática e mais aderente ao comportamento real das estruturas.

ABSTRACT

Concrete gravity structures, such as spillways and water intake structures, play an important role in hydropower and water supply dams. Their stability is influenced by variations in foundation uplift pressure, fluctuations in water level, and operational conditions, making instrumentation essential for structural monitoring. For this instrumentation to serve as an effective safety indicator, it is necessary to define control levels compatible with the actual behavior of the structure-foundation system, supporting safety management and operational decision-making. Traditionally, these levels are defined using the limit equilibrium method, which relies on simplifying assumptions. This work proposes a methodology based on the Finite Element Method for assessing the safety levels of concrete gravity structures. To this end, a three-dimensional model is developed in SAP2000, capable of representing the structural and geotechnical mechanisms involved. As its main contribution, the study presents an integrated approach that combines numerical modeling and automation through an API that updates the model with instrumentation data, enabling continuous calculation of safety factors and dynamic definition of control levels. The comparison with the limit equilibrium method highlights relevant differences in the interpretation of safety. It is concluded that the proposed methodology constitutes a practical alternative that is more consistent with the actual behavior of the structures.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas de gravidade em concreto, como vertedouros, muros de abraço e tomadas d'água, constituem elementos importantes nos arranjos de empreendimentos hidrelétricos e sistemas de captação de água. Conforme U.S. Army Corps of Engineers [1], essas estruturas mantêm sua estabilidade fundamentalmente pela ação do peso próprio, resistindo aos esforços externos por meio de sua geometria e massa. Por estarem permanentemente submetidas a empuxos hidrostáticos, subpressões na fundação e variações do nível d'água a montante e, em alguns casos, a jusante, sua condição de segurança é continuamente influenciada por fatores operacionais e ambientais. Dessa forma, o monitoramento estrutural constitui prática necessária à gestão da segurança e, quando aplicável, ao atendimento dos requisitos regulatórios.

No Brasil, a Lei nº 12.334/2010, posteriormente alterada pela Lei nº 14.066/2020 [20], instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens e consolidou diretrizes para o acompanhamento da segurança dessas estruturas, incluindo a organização de informações, a atuação dos órgãos fiscalizadores competentes e a responsabilidade do empreendedor pela segurança da barragem. Nesse contexto, a instrumentação (por meio de piezômetros, medidores de vazão, extensômetros, pêndulos, marcos superficiais e medidores de junta, entre outros) ocupa papel importante no acompanhamento do comportamento estrutural e no suporte à tomada de decisão operacional. Entretanto, para que a instrumentação cumpra efetivamente essa função, é necessário que os níveis de controle definidos reflitam o comportamento real da estrutura, e não apenas as hipóteses adotadas em projeto.

Historicamente, a análise de estabilidade de estruturas de gravidade em concreto é conduzida pelo método do equilíbrio limite, referenciado por critérios consolidados como os do U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation, Eletrobrás [1-

3]. Essa abordagem, embora de reconhecida praticidade e ampla aceitação normativa, fundamenta-se em hipóteses simplificadoras relevantes: trata a estrutura como corpo rígido indeformável, adota distribuição linear de tensões na base e não incorpora explicitamente os efeitos da deformabilidade da fundação nem da interação estrutura-fundação. Sob essa perspectiva crítica, Moftakhar e Ghafouri [4] apontam que a desconsideração das propriedades elásticas do maciço de fundação altera a distribuição real de tensões na interface, o que pode comprometer a acurácia dos fatores de segurança analíticos obtidos. Como consequência, a representatividade dos níveis de controle derivados exclusivamente dessas hipóteses simplificadas é afetada. Por essa razão, para fins de monitoramento e gestão de riscos em estruturas complexas, a prática moderna de engenharia tem condicionado a validação do comportamento estrutural a modelagens numéricas que incorporam a interação elástica com a fundação [5][6].

O Método dos Elementos Finitos (MEF) apresenta-se como alternativa mais aderente à realidade física do problema, ao representar o campo de tensões e deformações de forma compatível com a deformabilidade dos materiais, com as condições geomecânicas da fundação e com a interação estrutura-fundação. Sua aplicação a estruturas de barragens é discutida nas publicações do ICOLD [6], especialmente no Boletim 122 [6], que reconhece a relevância dos modelos numéricos para análises tensão-deformação, embora também destaque limitações e cuidados necessários na interpretação de resultados associados à estabilidade global.

O presente trabalho propõe uma metodologia para avaliação de níveis de segurança de estruturas de gravidade em concreto baseada no MEF, implementada em modelo tridimensional no software SAP2000 e integrada a um sistema de automação via API para atualização contínua do modelo com dados de instrumentação. Apresentam-se o desenvolvimento e a validação da metodologia, os resultados obtidos e a comparação com o método do equilíbrio limite, discutindo as implicações práticas das diferenças identificadas para a gestão da segurança estrutural.

2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ESTRUTURAS DE GRAVIDADE: PANORAMA HISTÓRICO E NORMATIVO

2.1 Evolução histórica dos métodos de análise

A análise de estabilidade de estruturas de gravidade em concreto tem raízes nos trabalhos de engenharia hidráulica desenvolvidos na segunda metade do século XIX, período em que o crescimento das demandas de irrigação e geração de energia impulsionou a construção sistemática de barragens na Europa e nos Estados Unidos. Nessa fase, os critérios de dimensionamento eram essencialmente empíricos, baseados em proporções geométricas estabelecidas por engenheiros pioneiros e validadas pela experiência construtiva acumulada, sem respaldo em formulações analíticas explícitas de equilíbrio.

A consolidação de uma abordagem analítica para a verificação da estabilidade global ocorreu progressivamente ao longo do século XX. O chamado método de gravidade, que trata a estrutura como corpo rígido e calcula as tensões na base a partir das teorias da Resistência dos Materiais, tornou-se o procedimento padrão para o projeto

de barragens de gravidade de concreto [7, 8]. Esse método possibilitou a formulação explícita das três verificações fundamentais de estabilidade (ao deslizamento, ao tombamento e à flutuação) por meio da comparação entre forças e momentos atuantes e resistentes ao longo de planos potenciais de ruptura predefinidos.

Um avanço metodológico relevante ocorreu com o reconhecimento do papel das subpressões na redução da resistência efetiva ao deslizamento. Os estudos de subpressões em barragens norte-americanas e brasileiras, sistematizados ao longo das décadas de 1960 e 1970 [9, 10], demonstraram que as pressões intersticiais na interface concreto-rocha são um fator condicionante da estabilidade, levando à incorporação de critérios específicos para o tratamento das subpressões nas principais normas e manuais de projeto. No âmbito brasileiro, Cruz e Fernandes [10] propuseram critério simplificado para o cálculo de subpressões em planos de descontinuidades de fundações de maciços basálticos, com base em dados medidos em barragens nacionais, contribuição que influenciou diretamente os critérios adotados posteriormente nos projetos de empreendimentos hidrelétricos brasileiros.

A adoção formal do método do equilíbrio limite pelo U.S. Army Corps of Engineers (USACE), a partir de 1981 [1], representou uma padronização importante do processo de verificação ao deslizamento, com a definição de fatores de segurança mínimos associados a combinações de carregamento normais, excepcionais e limites. Esse conjunto de critérios se tornou referência internacional amplamente utilizada, tanto diretamente quanto como base para a elaboração de critérios específicos de empreendimentos [11].

2.2 Métodos analíticos e normas vigentes

As principais referências normativas utilizadas internacionalmente para a análise de estabilidade de estruturas de gravidade em concreto são os critérios do U.S. Army Corps of Engineers [1], do U.S. Bureau of Reclamation (USBR) [2] e da Federal Energy Regulatory Commission (FERC) [9]. No Brasil, os Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás [3] constituem o documento de referência nacional, incorporando diretrizes baseadas nas recomendações dos organismos norte-americanos e adaptadas à realidade das fundações e condições hidrológicas brasileiras.

Todos esses critérios têm em comum a abordagem determinística de verificação de estabilidade global, expressa por meio de fatores de segurança mínimos que devem ser satisfeitos para cada combinação de carregamento. As verificações abrangem a segurança à flutuação (FSF), ao tombamento (FST) e ao deslizamento (FSD), sendo esta última a verificação mais condicionante na maioria dos casos práticos [3]. A Tabela 1 sintetiza os fatores de segurança mínimos exigidos pelos critérios Eletrobrás para os casos de carregamento normal (CCN), excepcional (CCE) e limite (CCL).

Tabela 1 – Fatores de segurança mínimos segundo os Critérios Eletrobrás [3]

Verificação	CCN	CCE	CCL
FSF	1,3	1,1	1,1
FST	1,5	1,2	1,1
Fsdc	3,0	1,5	1,3
Fsd	1,5	1,1	1,1

O USACE [1] define o critério de posição da resultante na base como indicador do tombamento, exigindo que a resultante de todas as forças permaneça dentro do terço médio da base para combinações de carregamento normais, com relaxamento desse limite para condições excepcionais. O USBR [2] estabelece o fator de segurança ao deslizamento por meio do Shear Friction Safety Factor (SFF), com valores mínimos de 3,0, 2,0 e 1,0 para carregamentos normal, excepcional e limite, respectivamente, no plano de contato concreto-rocha, sendo mais conservador que os critérios do USACE em situações típicas de projeto [6, 12]. A FERC [9], por sua vez, adota formulação semelhante ao USACE para a posição da resultante, com a particularidade de considerar a drenagem efetiva mesmo quando a fissura se estende além da linha de drenos.

O ICOLD documenta, em seus Boletins 93 [13] e 122 [6], as diretrizes para análise e modelagem computacional de barragens de gravidade de concreto, reconhecendo tanto os métodos analíticos tradicionais quanto as abordagens pelo Método dos Elementos Finitos. O Boletim 122 [6] classifica os fenômenos de segurança estrutural segundo índices de confiabilidade (IC), atribuindo IC=1 (nível máximo) ao problema de deslizamento e tombamento (equilíbrio de corpo rígido) para a fase de operação, o que indica plena adequação dos modelos numéricos para essa verificação.

No Brasil, cabe destacar que não existe normalização específica para o projeto de barragens de gravidade de concreto no âmbito da ABNT. O cenário normativo brasileiro é composto por critérios de grandes empresas e organismos setoriais, em especial os Critérios Eletrobrás [3], complementados pelas exigências regulatórias da Lei nº 12.334/2010 [20] e pelas resoluções da ANA. Situação semelhante é observada em outros países: Royet et al. [14] registram que, na França, não existe um método verdadeiramente padronizado para a comprovação da estabilidade de barragens de gravidade, sendo as práticas calcadas nas recomendações do USBR, USACE e do Comitê Francês de Grandes Barragens. Essa ausência de padronização unificada reforça a importância de metodologias bem fundamentadas que permitam a comparação e a rastreabilidade dos critérios adotados em cada projeto [12].

Ferramentas computacionais dedicadas à análise por métodos analíticos, como o programa CADAM (Computer Aided Stability Analysis of Gravity Dams) [15], têm sido utilizadas para sistematizar as verificações de estabilidade segundo múltiplos critérios normativos simultaneamente, facilitando comparações entre os resultados de USACE, USBR, FERC e Eletrobrás para uma mesma seção. Contudo, essas ferramentas operam dentro do mesmo paradigma do corpo rígido e da distribuição linear de tensões, não superando as limitações inerentes à abordagem analítica, discutidas na seção seguinte.

3. LIMITAÇÕES DO MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE FRENTE À REALIDADE DE CAMPO

3.1 Hipóteses simplificadoras e suas implicações

As verificações tradicionais de estabilidade global de estruturas de gravidade em concreto tratam a estrutura como corpo rígido, calculando as tensões na base pela teoria clássica de flexão composta da Resistência dos Materiais, que admite distribuição linear de tensões normais na seção transversal. Esse procedimento é válido para barragens de baixa a média altura fundadas em maciços rochosos rígidos [8, 22], condição que, na prática, nem sempre é satisfeita, como discutido na seção seguinte. As verificações à flutuação, ao tombamento e ao deslizamento são conduzidas ao longo de planos potenciais de ruptura predefinidos (tipicamente o contato concreto-rocha ou planos de fraqueza na fundação), sendo o fator de segurança calculado pela relação entre as forças resistentes e atuantes ao longo desses planos [3].

Uma implicação direta dessa abordagem é que o resultado depende criticamente da escolha do plano potencial de ruptura: se o plano adotado não for o mais crítico para a estrutura e fundação em análise, o fator de segurança calculado não representará o mínimo real e a solução estará contra a segurança [12]. Pelo método do equilíbrio limite considera-se, ainda, que todos os pontos do plano de análise plastificam simultaneamente, mobilizando integralmente os parâmetros de resistência dos materiais adotados, o que corresponde a uma solução de Estado Limite Último que desconsidera eventuais fenômenos de ruptura progressiva [12]. A compatibilidade de deformações (verificação excluída do método do equilíbrio limite) é reconhecida pelo próprio USACE [18] como fator relevante quando se antecipam grandes deformações diferenciais entre materiais de fundação distintos, situação em que o manual de fundações rochosas daquele organismo recomenda o uso complementar do MEF.

A despeito dessas limitações conceituais, o ICOLD [6] atribuiu índice de confiabilidade IC=1 (nível máximo) às análises de deslizamento e tombamento pelo método do equilíbrio limite e formulação de corpo rígido para o corpo da barragem, reconhecendo que, apesar da simplicidade dos métodos, os mesmos têm se mostrado geralmente confiáveis. O próprio Boletim 122 [6], contudo, ressalva que as limitações das formulações de corpo rígido podem ser minimizadas com o uso de métodos numéricos para avaliação do comportamento próximo à ruptura, fornecendo resultados de deformações e deslocamentos. Esse reconhecimento é válido para as verificações no corpo da barragem, mas a confiabilidade dos métodos diminui à medida que se passa a analisar o conjunto barragem-fundação, com heterogeneidades, planos de fraqueza e descontinuidades, onde os mecanismos de ruptura se tornam mais complexos [6].

Na prática de projeto, a falta de padronização normativa leva à adoção de diferentes critérios ao longo das etapas de desenvolvimento, o que pode alterar o estado de segurança avaliado para uma mesma seção. Gutstein [12] documenta casos em que a mudança de critério (entre USACE, USBR e Eletrobrás) resulta em avaliações divergentes da estabilidade de uma mesma seção, gerando dúvidas nas fases iniciais de projeto quanto ao critério a adotar.

3.2 Discrepâncias entre idealização analítica e comportamento real

A hipótese de distribuição linear de tensões na base da estrutura, central ao método de gravidade e ao equilíbrio limite, pressupõe que a fundação se comporte como suporte indeformável. O USBR [2] reconhece explicitamente que um conhecimento profundo da deformabilidade da fundação é necessário para a previsão de recalques diferenciais, para a determinação de concentrações de tensões devidas a regiões adjacentes de baixo módulo de elasticidade e para a definição da distribuição de tensões a adotar em estudos de estabilidade. Apesar desse reconhecimento, os critérios simplificados de verificação não incorporam esse efeito no cálculo dos fatores de segurança, como demonstrado por Moftakhar e Ghafouri [4].

A influência da deformabilidade das fundações no estado de tensões de barragens de gravidade de concreto foi extensivamente investigada pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal), conforme documentado por Rocha (1974 e 1977, apud Gutstein [12]), em estudos que abrangeram mais de 250 modelos ao longo de 25 anos. Os resultados indicam que a deformabilidade é relevante mesmo para maciços de elevada resistência, sendo agravada pela presença de anisotropia, heterogeneidade e variação espacial do módulo de elasticidade; a flutuação de deformabilidade de ponto a ponto pode implicar deslocamentos diferenciais de grande importância para a distribuição de tensões na base [12].

Gutstein [12] comprovou numericamente, por meio de análises paramétricas pelo MEF, que a aproximação da barragem como corpo rígido perde progressivamente a validade à medida que o maciço de fundação é mais deformável. Para o contato concreto-rocha, as distribuições de tensões obtidas por MEF se aproximam da reta prevista pela Resistência dos Materiais apenas para maciços mais rígidos, com exceção das regiões de singularidade nos cantos da base, onde ocorrem concentrações de tensões não representadas pelo método analítico. Para planos de descontinuidades na fundação, as diferenças em relação à distribuição linear são ainda mais expressivas, aumentando com a deformabilidade do maciço especialmente nas regiões centrais da base [12]. Esses resultados foram obtidos comparando-se os diagramas de tensões do MEF com aqueles calculados pela metodologia de corpo rígido recomendada pelo USBR [2] e pelo USACE [1], evidenciando divergências crescentes à medida que aumenta a deformabilidade relativa da fundação em relação ao concreto.

Além da deformabilidade, a distribuição real de subpressões na base da estrutura constitui outra fonte de discrepância entre a idealização analítica e o comportamento de campo. Os critérios simplificados de projeto adotam distribuições lineares ou bilineares de subpressão (com e sem a consideração de cortinas de drenagem), conforme prescrições do USBR [2] e Eletrobrás [3]. Contudo, a determinação das subpressões reais envolve parâmetros hidrogeológicos complexos que tornam os critérios simplificados essencialmente conservadores na maioria dos casos, embora não necessariamente representativos do campo em todas as situações [12]. Cruz e Barbosa [11] demonstraram, com base em medições de subpressões em barragens brasileiras, que o comportamento real do campo de pressões intersticiais é influenciado pelas condições específicas de operação da drenagem (operação normal e operação excepcional com bombeamento inoperante), condições que se refletem diretamente nos fatores de segurança ao deslizamento e que devem ser tratadas

como casos de carregamento distintos na verificação da estabilidade [11]. Essa variabilidade de campo não é capturada pelos diagramas fixos preconizados pelos métodos analíticos, reforçando a necessidade de instrumentação contínua e de modelos capazes de incorporar a atualização dinâmica das subpressões.

Em síntese, as simplificações inerentes ao método do equilíbrio limite (indeformabilidade da fundação, distribuição linear de tensões e subpressão idealizada) produzem fatores de segurança que podem divergir significativamente dos valores correspondentes ao estado real de tensões da estrutura. Essa divergência, documentada tanto analiticamente [4] quanto numericamente [12], tem implicação direta sobre os níveis de controle de instrumentação derivados desses fatores: níveis de controle calculados a partir de hipóteses que não refletem o comportamento real da estrutura e de sua fundação podem subestimar ou superestimar as condições de risco, comprometendo a efetividade do sistema de monitoramento como ferramenta de gestão da segurança.

4. INSTRUMENTAÇÃO E NÍVEIS DE CONTROLE

4.1 Papel da instrumentação no monitoramento estrutural

No contexto da segurança de barragens, a instrumentação constitui uma das principais barreiras mitigadoras de risco disponíveis ao longo da vida operacional das estruturas. Gutstein [12] destaca que, em estruturas de barragens, a associação de instrumentação adequada ao monitoramento constante de deformações, subpressões e deslocamentos é um exemplo paradigmático de barreira mitigadora, ressalvando que a mera presença de instrumentos na estrutura, sem análise cuidadosa e sistemática das leituras, não é garantia de minimização do risco ou de maior segurança. O valor da instrumentação não reside na existência física dos dispositivos, mas na capacidade de interpretação dos dados gerados em relação a parâmetros de referência previamente estabelecidos.

A importância do monitoramento instrumentado é reconhecida no arcabouço regulatório brasileiro. A Lei nº 12.334/2010 [20], que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens, estabelece a obrigatoriedade de sistemas de monitoramento e de planos de segurança ao longo de toda a vida útil das estruturas, sob coordenação e fiscalização da ANA. No âmbito do setor elétrico, o projeto de pesquisa e desenvolvimento GAP/UFSC/FEESC e Tractebel Energia [18] dedicou-se especificamente ao desenvolvimento de critérios de auscultação, instrumentação e de projeto civil visando a segurança de barragens, reconhecendo a necessidade de integrar instrumentação e análise estrutural de forma sistemática [12].

A subpressão é a grandeza monitorada de maior relevância para a estabilidade de estruturas de gravidade em concreto, por sua influência direta sobre a resistência ao deslizamento nos planos potenciais de ruptura [2, 3]. Gutstein [12] aponta que os critérios simplificados de subpressão adotados pelo USBR até hoje foram estabelecidos com base em dados observacionais obtidos pela instrumentação de barragens ao longo dos anos, evidenciando que a instrumentação não apenas monitora o comportamento em operação, mas alimenta historicamente o próprio refinamento dos critérios de projeto. Nesse sentido, a compilação e análise

sistemática de dados de instrumentação de barragens brasileiras em operação poderia contribuir para o aprimoramento dos modelos numéricos e critérios simplificados aplicáveis às condições específicas das fundações nacionais [12].

4.2 Definição de níveis de controle: estado da arte e limitações

A efetividade da instrumentação como ferramenta de segurança depende da definição de valores de referência (denominados níveis de controle) em relação aos quais as leituras medidas são comparadas em cada fase da vida da obra. Gutstein [12] descreve esse processo como o monitoramento e acompanhamento da estrutura por meio da análise da instrumentação em relação ao estabelecido em projeto para cada fase, sendo os níveis de controle derivados diretamente dos casos de carregamento definidos para a verificação da estabilidade global: carregamento normal (CCN), excepcional (CCE) e limite (CCL), conforme os critérios Eletrobrás [3]. Nesse enquadramento, os níveis de controle correspondem aos valores de subpressão, nível d'água e demais grandezas monitoradas associados aos limiares de segurança estabelecidos para cada combinação de carregamento.

A prática atual de definição desses níveis, contudo, herda diretamente as limitações dos métodos analíticos discutidos nas seções anteriores. Ao serem calculados com base no método do equilíbrio limite e nas hipóteses de corpo rígido, os fatores de segurança que balizam os níveis de controle não incorporam a influência da deformabilidade da fundação nem a distribuição real de tensões na base da estrutura [4, 12]. Em consequência, os limiares de alerta para subpressão derivados desse processo podem não corresponder aos estados reais de tensão da estrutura: um nível de subpressão classificado como normal pelo critério analítico pode, em função do comportamento real da fundação, estar associado a um estado de tensões mais crítico do que o previsto, ou inversamente, um alarme pode ser disparado em condições que o modelo mais representativo indicaria como seguras.

Gutstein [12] aponta, ainda, que a ruptura ao deslizamento de uma barragem de gravidade pode ocorrer quando a subpressão real supera os níveis estabelecidos em projeto, quando o peso próprio não atinge os valores mínimos previstos ou quando os parâmetros de resistência dos materiais ficam aquém dos estimados — variáveis que fazem parte de uma análise de risco estruturada e que devem ser contempladas nos planos de monitoramento. O monitoramento da subpressão ao longo da vida útil é, portanto, explicitamente identificado como medida mitigadora indispensável nessa análise de risco [12], condicionada, porém, à definição de níveis de controle que sejam representativos do comportamento real e não apenas dos resultados de métodos simplificados.

5. JUSTIFICATIVA E FUNDAMENTOS DO USO DO MEF

O Método dos Elementos Finitos teve sua origem no desenvolvimento de técnicas de análise estrutural entre os séculos XVIII e XIX, a partir da convergência entre

mecânica, matemática, análise numérica e computação. A partir da década de 1960, o método teve evolução exponencial de aplicação em estruturas, sendo adotado no Brasil para análise de barragens a partir da década de 1970 [12]. Atualmente, o MEF é o método mais difundido na área de modelagem computacional de estruturas e fundações [12], sendo recomendado pelos próprios critérios normativos de referência [1] [2] [9] como ferramenta para o refinamento das análises em situações de geometria complexa ou grande variação das propriedades dos materiais.

Do ponto de vista operacional, o MEF converte um modelo matemático contínuo em um modelo discreto com número limitado de graus de liberdade, permitindo representar a geometria real da estrutura e da fundação, atribuir propriedades distintas a cada material e obter o campo completo de tensões e deformações em qualquer ponto do domínio modelado [12]. Para as estruturas de gravidade em concreto, a análise elástico-linear é a abordagem habitual e considerada apropriada para a determinação do estado de tensão-deformação, uma vez que os níveis de carregamento se situam no trecho linear das leis constitutivas dos materiais envolvidos [12]. Análises não-lineares são menos comuns na prática de projeto, sendo empregadas principalmente em pesquisa e na avaliação de estruturas existentes, dadas as dificuldades de obtenção de parâmetros e de convergência dos modelos [12].

A principal vantagem do MEF frente aos métodos analíticos, no contexto da estabilidade de estruturas de gravidade, reside na capacidade de incorporar a influência da deformabilidade da fundação sobre a distribuição de tensões na base — efeito sistematicamente ignorado por todos os critérios normativos vigentes [6]. O USACE [1] reconhece essa vantagem ao afirmar que o MEF permite modelar fundações complicadas envolvendo múltiplos materiais, juntas e fraturas, e que a rigidez relativa entre os materiais da fundação e do concreto pode influenciar os resultados de análise de estabilidade. O manual de fundações rochosas do mesmo organismo [19] recomenda o MEF especificamente quando forem antecipadas grandes deformações diferenciais entre materiais de fundação distintos, condição que corresponde exatamente às situações em que o método do equilíbrio limite produz resultados menos representativos do comportamento real [12].

O ICOLD [6] ratifica essa posição ao observar que as limitações das formulações de corpo rígido podem ser minimizadas pelo uso de métodos numéricos para avaliação do comportamento próximo à ruptura, fornecendo resultados de deformações e deslocamentos. Moftakhar e Ghafouri [4] demonstraram, por comparação direta entre os resultados de análises pelo MEF e pelos três principais critérios normativos norte-americanos, que a distribuição de tensões na base obtida pelo MEF difere substancialmente da distribuição linear assumida pelos métodos analíticos, e que essa diferença afeta diretamente os fatores de segurança calculados, concluindo que o emprego do MEF é necessário mesmo nas fases iniciais de projeto de barragens de gravidade de concreto.

Além da maior representatividade física, o MEF oferece vantagem operacional relevante para o contexto do presente trabalho: a possibilidade de calibração e atualização do modelo com dados de instrumentação medidos em campo. Gutstein [12] aponta que modelos de elementos finitos elaborados para acompanhamento estrutural podem ser continuamente refinados a partir dos dados observacionais de

instrumentação, permitindo ajustar os parâmetros do modelo ao comportamento real identificado ao longo da vida útil da estrutura. Essa característica, combinada com o uso de interfaces de programação via API, cria as condições para o cálculo contínuo e automatizado dos fatores de segurança, superando a natureza estática dos níveis de controle derivados exclusivamente de cálculos de projeto

6. METODOLOGIA PROPOSTA

6.1 Visão geral

A metodologia proposta compreende um fluxo integrado de modelagem numérica, automação e análise, organizado em quatro grandes etapas sequenciais: (i) construção e discretização do modelo tridimensional da estrutura; (ii) implementação de uma API em Python para controle autônomo do software de análise; (iii) simulação da interação estrutura-fundação com atualização dinâmica de subpressões a partir de dados de instrumentação; e (iv) extração das reações de apoio e cálculo dos fatores de segurança. O software SAP2000 foi adotado como plataforma de análise por elementos finitos, sendo a ferramenta difundida em escritórios de projeto de estruturas de barragens no Brasil [12, 20], e por dispor de interface de programação que viabiliza a automação das operações de pré e pós-processamento.

6.2 Modelagem geométrica e discretização

O modelo geométrico tridimensional da estrutura foi desenvolvido no software AutoCAD, preservando integralmente todas as características geométricas do elemento estrutural real: seção transversal, variações de largura ao longo do eixo longitudinal, aberturas, galerias e detalhes de contorno. Essa fidelidade geométrica é necessária para que as propriedades de distribuição de massa e rigidez do modelo sejam representativas da estrutura real, condição necessária para a confiabilidade dos resultados de tensão e das reações de apoio utilizadas nos cálculos de estabilidade [12].

O sólido gerado no AutoCAD foi exportado e importado pelo software de geração de malhas Gmsh [21], onde foi criada uma malha de elementos sólidos tetraédricos. O tamanho dos elementos foi definido de forma a garantir representação fidedigna da geometria e convergência dos resultados de tensão nas regiões de interesse, em particular na interface com a fundação, onde as tensões de contato são extraídas para o cálculo dos fatores de segurança. Gutstein [12] recomenda refinamento progressivo da malha nas regiões de análise de tensões, especialmente no contato concreto-rocha, onde ocorrem concentrações de tensão que podem ser sensíveis à discretização.

A conversão da malha gerada no Gmsh para o modelo de elementos finitos no SAP2000 foi realizada por meio de uma aplicação desenvolvida em Python, responsável pela leitura do arquivo de saída do Gmsh, identificação dos nós e conectividades dos elementos tetraédricos, e criação automatizada do modelo sólido correspondente dentro do SAP2000 [20]. Essa etapa de conversão automatizada

elimina a necessidade de retrabalho manual na geração do modelo e garante a rastreabilidade e reprodutibilidade do processo.

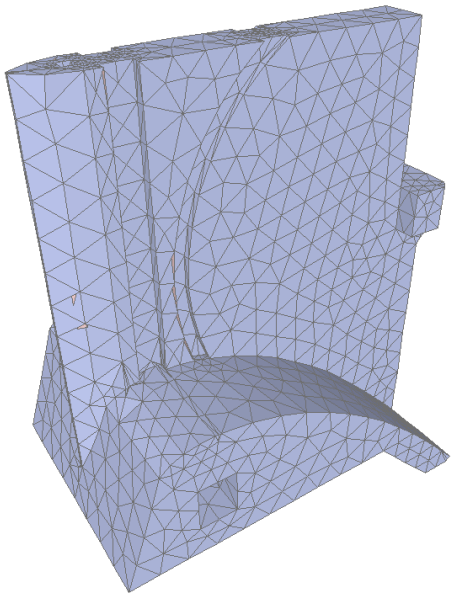


Figura 1 – Exemplo de um vertedouro modelo para uso com esta metodologia - Modelo MEF SAP 2000.

6.3 API de controle autônomo do SAP2000

A automação das operações de análise foi implementada por meio de uma API desenvolvida em Python, capaz de manipular o SAP2000 de forma autônoma via sua interface de objetos COM (Component Object Model). A API desenvolvida é capaz de: (i) aplicar carregamentos sobre o modelo (peso próprio, empuxo hidrostático, sedimentos e subpressão) correspondentes aos casos de carregamento normal, excepcional e limite definidos pelos critérios Eletrobrás [3]; (ii) definir e modificar as condições de contorno na base da estrutura por meio de molas elásticas lineares; (iii) remover seletivamente molas que apresentem reação de tração, garantindo a coerência física do modelo; e (iv) atualizar automaticamente o carregamento de subpressão a partir de dados tabulados, que podem ser oriundos diretamente de instrumentação de campo.

Essa arquitetura de automação responde à necessidade identificada por Gutstein [12] de que os modelos de elementos finitos elaborados para acompanhamento estrutural possam ser continuamente atualizados com dados de instrumentação, permitindo o cálculo dinâmico dos fatores de segurança ao longo da vida útil da estrutura.

6.4 Simulação da interação estrutura-fundação e cálculo dos fatores de segurança

A interação entre a estrutura de concreto e a fundação rochosa foi simulada por meio de molas elásticas lineares distribuídas nos nós da face inferior do modelo, em substituição à modelagem explícita do maciço rochoso. Essa abordagem, discutida por Gutstein [12] como alternativa ao modelo do conjunto barragem-fundação quando

se deseja reduzir a complexidade do modelo mantendo a representatividade da deformabilidade de suporte, permite que as reações de apoio reflitam o comportamento elástico da fundação por meio de coeficientes de rigidez compatíveis com o módulo de elasticidade do maciço. Para simular a condição real de contato (em que a interface concreto-rocha não é capaz de transmitir tração) a API executa, de forma autônoma, uma sequência iterativa de análises: ao final de cada ciclo, as molas cujas reações indicam tração são removidas do modelo e uma nova análise é processada, repetindo-se o procedimento até que nenhuma mola tracionada permaneça ativa e o modelo esteja estabilizado.

A subpressão é aplicada como carga distribuída ascendente nos nós da base da estrutura, interpolada espacialmente a partir dos valores medidos pelos instrumentos de campo cuja correspondência locacional no modelo é previamente cadastrada. A interpolação é realizada automaticamente pela API, que atribui a cada nó da base o valor de subpressão correspondente à sua posição geométrica. Nos trechos de base descolada (identificados pela remoção das molas tracionadas) a subpressão pode ser atualizada iterativamente de acordo com a evolução da fratura simulada, de forma análoga ao procedimento de análise de base fraturada descrito por Gutstein [12] e por Jansen [8].

Ao final do processo iterativo, as reações das molas ativas na base do modelo são extraídas e processadas por um núcleo numérico implementado em Python. A partir dessas reações, e empregando álgebra linear, são calculados: (i) a resultante das forças normais e a sua excentricidade na base, para a verificação ao tombamento, sendo o fator de segurança ao tombamento (FST) obtido pela relação entre o somatório dos momentos estabilizantes e o somatório dos momentos de tombamento em relação ao ponto de rotação, conforme os critérios Eletrobrás [3]; (ii) a distribuição de tensões normais de contato ao longo da base da estrutura, verificando-se a posição da resultante em relação ao núcleo central de inércia da seção para cada combinação de carregamento; (iii) os fatores de segurança ao deslizamento (FSD) e à flutuação (FSF), calculados segundo as expressões do critério de Mohr-Coulomb conforme os critérios Eletrobrás [3], para os casos de carregamento normal, excepcional e limite. Os valores de FST, FSD e FSF obtidos são então confrontados com os fatores de segurança mínimos admissíveis para cada combinação de carregamento, permitindo a definição dinâmica dos níveis de controle de instrumentação diretamente vinculados ao comportamento estrutural real.

7. EXEMPLO DE APLICAÇÃO: VERTEDOURO DE USINA HIDRELÉTRICA FLUVIAL

7.1 Descrição do problema

A metodologia descrita nas seções anteriores foi aplicada ao vertedouro de uma usina hidrelétrica fluvial, operando em regime a fio d'água com variação de nível do reservatório de apenas 0,2 m. A estrutura de concreto armado com resistência de 25 MPa é do tipo superfície controlada, composta por quatro vãos com comportas de segmento de 12,50 m de largura por 15,45 m de altura, com capacidade máxima de descarga de 7.200 m³/s. O vertedouro é dividido em três módulos estruturais independentes (dois módulos laterais simétricos entre si e um módulo central), tendo

sido analisados um módulo lateral (VT-1) e o módulo central (VT-2), por constituírem os casos representativos do conjunto (ver figuras 2 e 3).

A geometria de cada módulo foi reproduzida integralmente no AutoCAD, preservando todas as características geométricas e a distribuição real de massa da estrutura. Os sólidos foram importados para o Gmsh, onde foram geradas malhas de elementos tetraédricos com refinamento adequado nas regiões de interesse. A conversão para o SAP2000 [20] foi realizada pela aplicação Python desenvolvida, resultando em modelos tridimensionais de elementos sólidos com condições de contorno representadas por molas elásticas lineares compressivas na base, conforme descrito na seção 6.4.

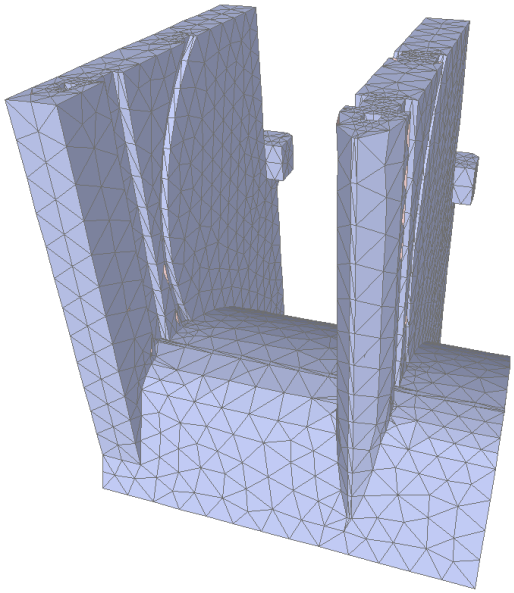


Figura 2: Vertedouro VT-1.

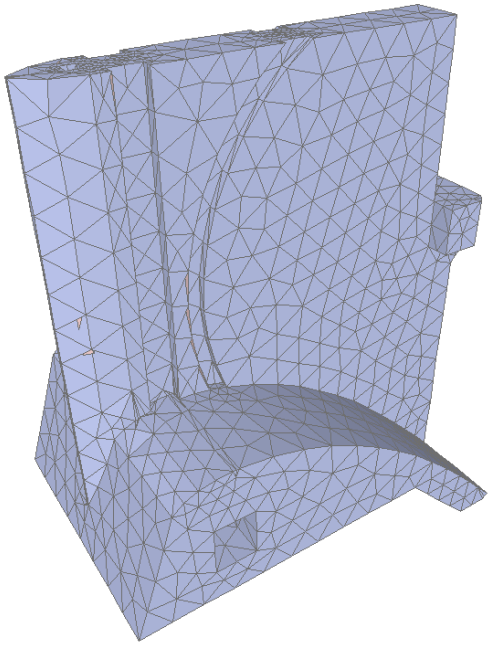


Figura 3: Vertedouro VT-2.

Carregamentos e casos de análise. Sobre os modelos atuam peso próprio (γ = 2,5 tf/m³), empuxo hidrostático a montante e subpressão. Para o caso de carregamento normal (CCN), foram adotados o Nível d'água Máximo Normal a montante (El. 808,00 m) e o nível de jusante correspondente (El. 771,52 m); para o caso excepcional (CCE), o Nível Máximo Maximorum a montante (El. 810,70 m) e o nível de jusante (El. 784,74 m), totalizando dois casos de carga por módulo. Os fatores de segurança admissíveis foram adotados conforme a ABNT NBR 13028 [22], reproduzidos na Tabela 2.

Tabela 2 — Fatores de segurança admissíveis para estruturas de concreto (ABNT NBR 13028 [22])

Caso de Carga	FSF	FST	FSD (fsd)	FSD (fsdc)	Área Comprimida
Normal	1,3	1,5	1,5	3,0	100%
Excepcional	1,1	1,1	1,1	1,5	>67%

A subpressão foi determinada diretamente a partir das leituras dos piezômetros instalados em cada módulo. Para cada instrumento, o valor característico de subpressão foi calculado ao nível do percentil 95%, com base na série histórica dos últimos três anos. A aderência à distribuição normal foi verificada pelos testes de Shapiro-Wilk e Anderson-Darling; para séries paramétricas, o valor característico foi calculado como $\mu + z_{95} \cdot \sigma$ (com $z_{95} \approx 1{,}645$); para séries não paramétricas, por interpolação sobre os dados ordenados. Os valores característicos obtidos foram de El. 801,53 m (montante) e El. 789,25 m (jusante) para VT-1, e El. 802,05 m (montante) e El. 787,01 m (jusante) para VT-2.

Para a definição dos níveis de controle, a API executou automaticamente 16 cenários de subpressão por caso de carregamento e por módulo, combinando quatro valores distintos para o piezômetro de montante (variando linearmente do valor característico até o nível d'água máximo do reservatório) com quatro valores para o piezômetro de jusante, variando do valor característico até o valor do piezômetro de montante correspondente. Para o caso excepcional, os limites superiores foram ampliados até o Nível Máximo Maximorum. Ao todo, 32 cenários foram analisados por módulo, cobrindo sistematicamente o espaço de possíveis estados de subpressão medidos em campo.

7.2 Resultados

Para as condições de referência (subpressão nos valores característicos dos piezômetros), os fatores de segurança obtidos para VT-1 e VT-2 no CCN foram idênticos: FSF = 5,19, FST = 2,12 e FSD = 1,92, com 63,39% de área comprimida na base. No CCE, VT-1 apresentou FSF = 9,06, FST = 2,68 e FSD = 1,67, e VT-2 FSF = 9,16, FST = 2,53 e FSD = 1,57. Todos os fatores superam amplamente os mínimos admissíveis em ambos os casos de carregamento, indicando condição de segurança satisfatória para as subpressões atualmente medidas em campo.

A partir das 32 superfícies de resposta calculadas, foram identificadas as combinações de leituras piezométricas que conduzem aos limiares de segurança definidos normativamente. Para o tombamento em CCN de VT-1, o nível de controle

normal (FST = 1,50) é atingido para leituras do piezômetro de montante acima de El. 804,94 m combinadas com jusante elevado; o nível de atenção (FST = 1,30) é alcançado apenas para leituras próximas ao nível máximo do reservatório (El. 808,00 m) em ambos os instrumentos. Para o deslizamento em CCN, o nível de controle normal (FSD = 1,50) é atingido para montante acima de El. 806,09 m. No CCE, nenhum dos 16 cenários simulados leva os fatores abaixo dos mínimos admissíveis, indicando que, mesmo sob nível máximo maximorum, a estrutura permanece estável para toda a faixa de subpressões fisicamente possíveis. Os níveis de controle definidos por esse procedimento são, portanto, associados diretamente a leituras piezométricas reais e ao comportamento tensional efetivo da estrutura, em contraposição a limiares arbitrários derivados de hipóteses analíticas simplificadas.

A execução sistemática dos cenários pela API possibilitou a construção de ábacos de resposta estrutural, como os apresentados nas Figuras 4 e 5, que relacionam continuamente as leituras dos piezômetros de montante e de jusante aos respectivos fatores de segurança calculados pelo modelo. Cada ábaco constitui uma superfície bidimensional de resposta na qual qualquer par de leituras piezométricas medidas em campo pode ser imediatamente posicionado, permitindo identificar o fator de segurança corrente da estrutura sem a necessidade de reprocessamento do modelo. Esse formato de apresentação transforma o resultado das análises numéricas em uma ferramenta operacional direta: o engenheiro responsável pelo monitoramento consulta o ábaco com as leituras mais recentes dos instrumentos e verifica, de forma instantânea, se a estrutura permanece dentro do domínio seguro ou se algum nível de controle foi atingido. A geração automatizada desses ábacos para cada estrutura, caso de carregamento e verificação de segurança (flutuação, tombamento e deslizamento) constitui, portanto, o produto final operacional da metodologia proposta, materializando a integração entre modelagem numérica avançada e gestão prática da segurança estrutural.

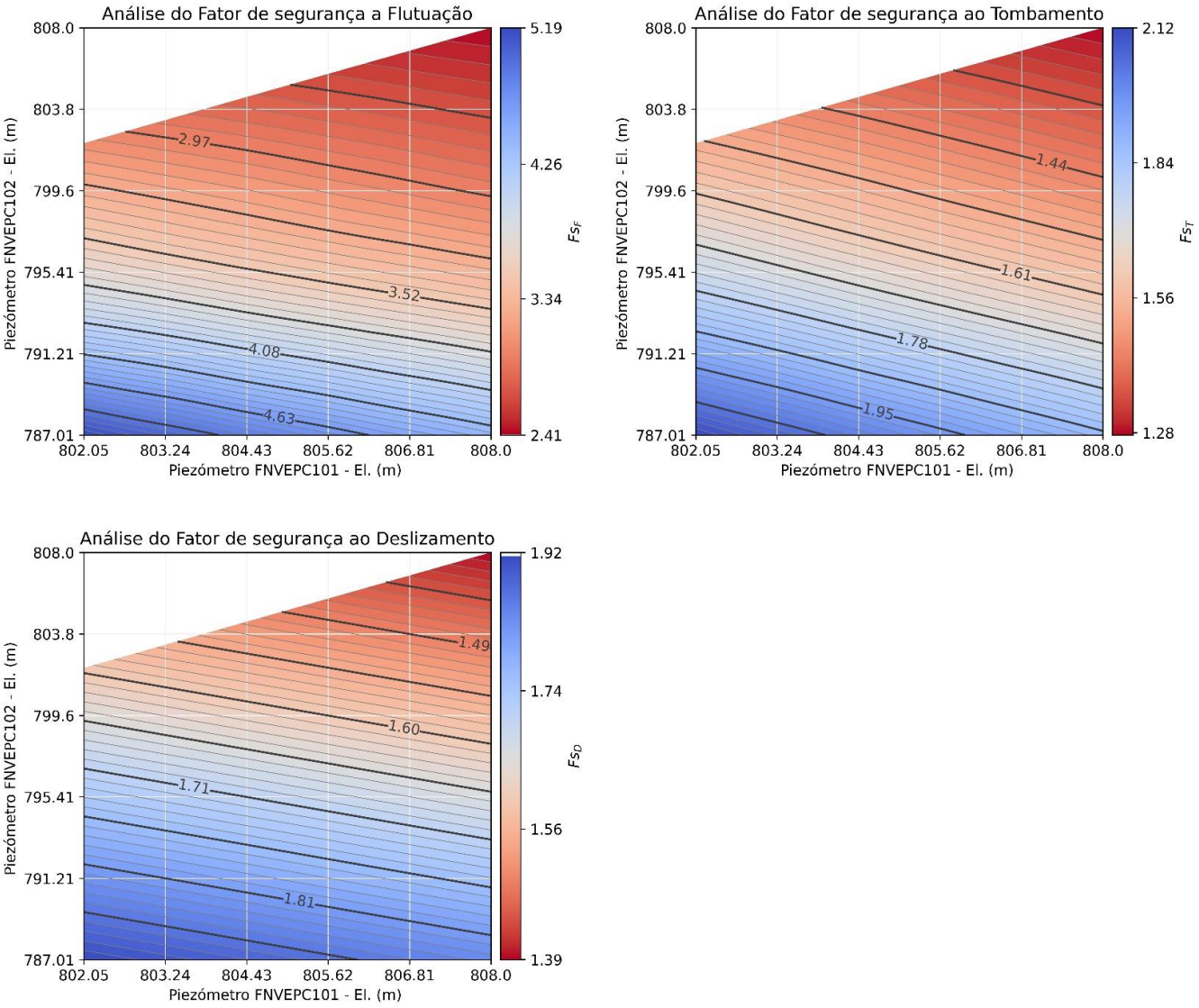


Figura 4: Vertedouro – VT-1 - CCN

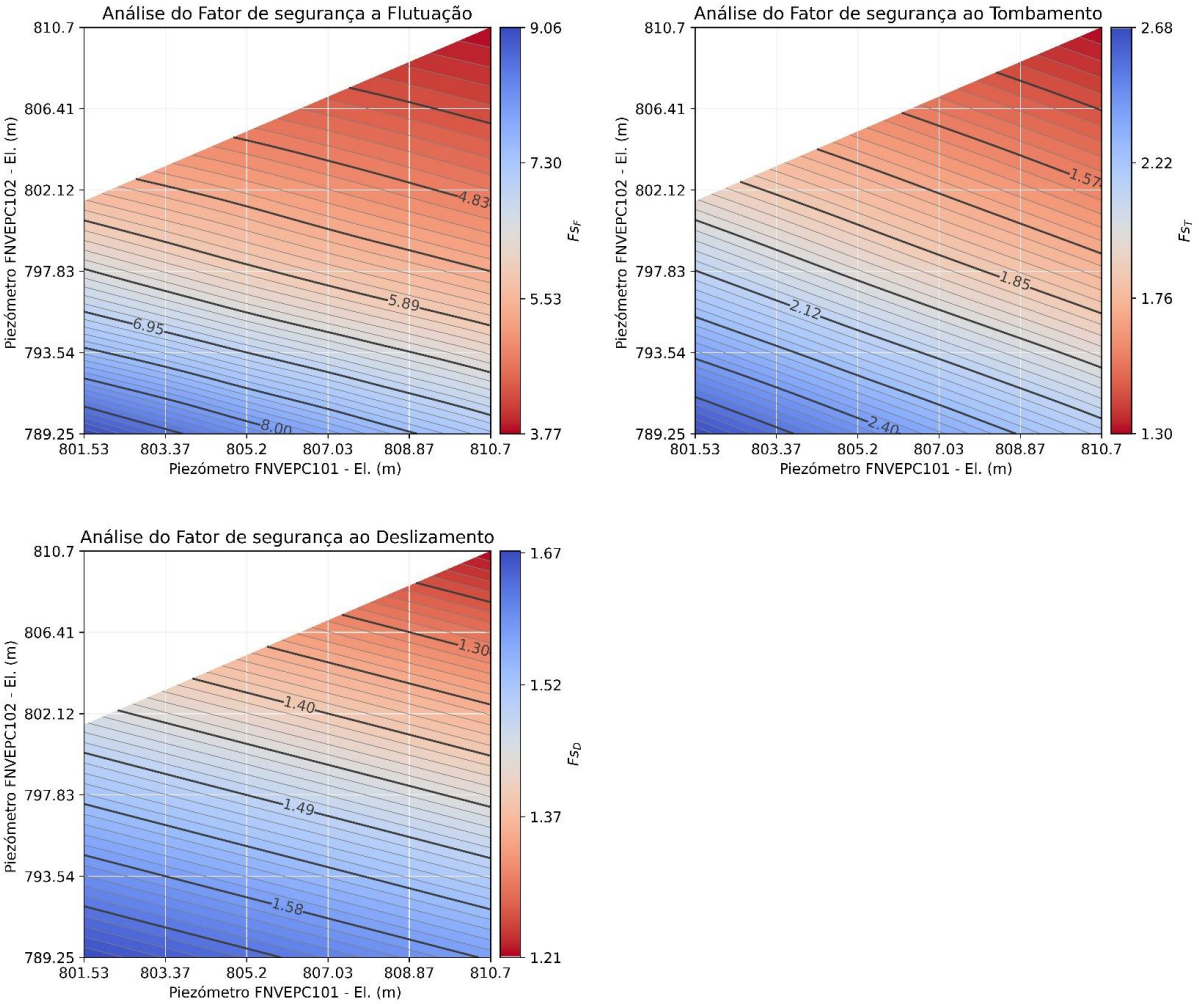


Figura 5: Vertedouro – VT-1 – CCE

A mesma estrutura foi submetida a verificação de estabilidade pelo método analítico de equilíbrio limite, adotando distribuição linear de tensões na base conforme a teoria de corpo rígido preconizada pelos critérios do USACE [1], USBR [2] e Eletrobrás [3]. Os fatores de segurança à flutuação, ao tombamento e ao deslizamento obtidos por esse método não se desviaram de forma significativa dos valores calculados pelo modelo MEF, confirmando a validade prática das abordagens analíticas para a determinação global dos coeficientes de segurança [6]. Contudo, a distribuição de tensões normais ao longo da base da estrutura apresentou diferenças relevantes entre as duas abordagens: enquanto o método analítico impõe, por hipótese, um diagrama linear de tensões o modelo MEF revela uma distribuição não linear, com concentrações de tensão compressiva junto à face de jusante e relaxamento na região de montante, reflexo da deformabilidade elástica da estrutura e das condições de contorno impostas pelas molas. Esse contraste valida a metodologia proposta em dois sentidos complementares: de um lado, a coerência dos fatores de segurança com os valores analíticos demonstra que o modelo é consistente com as referências normativas consolidadas; de outro, a diferença na distribuição de tensões evidencia que o MEF acrescenta informação estrutural que os métodos simplificados não são capazes de fornecer, corroborando as conclusões de Moftakhar e Ghafouri [6] de que nenhum dos critérios regulatórios vigentes incorpora as propriedades elásticas da

fundação no cálculo da distribuição de tensões na base, limitação que o presente modelo supera e que fundamenta a representatividade superior dos níveis de controle dele derivados.

8. CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs e aplicou uma metodologia para avaliação de níveis de segurança de estruturas de gravidade em concreto baseada no Método dos Elementos Finitos, com automação via API e integração direta com dados de instrumentação. A partir da aplicação ao vertedouro de uma usina hidrelétrica fluvial, as seguintes conclusões podem ser formuladas.

A metodologia desenvolvida mostrou-se funcional e operacionalmente viável. O fluxo integrado entre modelagem geométrica no AutoCAD, geração de malha tetraédrica no Gmsh, conversão automática para o SAP2000 e controle autônomo via API em Python demonstrou capacidade de reproduzir com fidelidade a geometria real das estruturas, aplicar os carregamentos pertinentes, simular o descolamento progressivo da base por remoção iterativa de molas tracionadas e calcular automaticamente os fatores de segurança à flutuação, ao tombamento e ao deslizamento para múltiplos cenários de subpressão derivados da instrumentação de campo.

A comparação com o método do equilíbrio limite confirmou que os fatores de segurança obtidos pelo MEF são consistentes com os valores calculados pela abordagem analítica, validando a representatividade do modelo em relação às referências normativas consolidadas [1, 2, 3, 6]. Contudo, a distribuição de tensões na base da estrutura revelou diferenças expressivas entre as duas abordagens: o método analítico impõe por hipótese uma distribuição linear que não reflete os efeitos da deformabilidade estrutural, ao passo que o MEF produz distribuições não lineares mais aderentes ao comportamento real. Essa diferença, documentada em literatura [4, 12], tem implicação direta sobre a representatividade dos níveis de controle: limiares derivados exclusivamente do método do equilíbrio limite podem não corresponder aos estados de tensão reais que os instrumentos efetivamente refletem.

A geração de ábacos de resposta estrutural (relacionando continuamente as leituras piezométricas aos fatores de segurança) constitui o produto operacional central da metodologia e representa um avanço prático em relação à prática atual de níveis de controle estáticos. A abordagem proposta permite que qualquer leitura de instrumentação seja imediatamente associada ao estado de segurança da estrutura, sem reprocessamento do modelo, tornando o monitoramento um processo dinâmico e estruturalmente fundamentado.

Como desenvolvimentos futuros, recomenda-se a investigação da sensibilidade dos resultados aos parâmetros de rigidez das molas de fundação, a extensão da metodologia para análises probabilísticas dos fatores de segurança e a calibração dos modelos com séries históricas de instrumentação mais longas, de forma a aprimorar a representatividade dos valores característicos de subpressão adotados.

9. PALAVRAS-CHAVE

Segurança de barragens de concreto, Instrumentação integrada e automação, Avaliação avançada de estabilidade, elementos finitos

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1995) – "Gravity Dam Design (EM 1110-2-2200)". Anais do Quartel-General do Departamento do Exército, Engenharia e Projeto

de Estruturas Civis, Volume 1, Washington D.C.

[2]. U.S. BUREAU OF RECLAMATION (1976) – "Design of Gravity Dams: A Water Resources Technical Publication". Anais do Departamento do Interior dos Estados Unidos, Engenharia de Estruturas Civis e Recursos Hídricos, Volume 1, Denver.

[3]. CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. – ELETROBRÁS (2003) – "Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas". Anais do Comitê Brasileiro de Barragens, Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens, Volume 1, Rio de Janeiro.

[4]. MOFTAKHAR, M.; GHAFOURI, H. R. (2011) – "Comparison of Stability Criteria for Concrete Dams in Different Approximate Methods Based on Finite Element Analysis". Anais da Procedia Engineering, Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 14, Amsterdã.

[5]. FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION – FERC (2016) – "Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects: Chapter 3 - Gravity Dams". Anais da Divisão de Segurança e Inspeções de Barragens, Segurança de Estruturas Hidrelétricas, Volume 3, Washington D.C.

[6]. INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD (2020) – "Non-Linear Modelling of Concrete Dams". Anais do Comitê Técnico A - Aspectos Computacionais de Análise e Projeto de Barragens, Modelagem Avançada de Estruturas de Concreto, Bulletin 177, Paris.

[7]. MASON, J. (1988) – Roller Compacted Concrete. McGraw-Hill, Nova York.

[8]. JANSEN, R. B. (1988) – Advanced Dam Engineering for Design, Construction and Rehabilitation. Van Nostrand Reinhold, Nova York.

[9]. FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION – FERC (1991) – Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects: Chapter 3 – Gravity Dams. Division of Dam Safety and Inspections, Washington D.C.

[10]. CRUZ, P. T.; FERNANDES, E. G. (1978) – "Critério simplificado para cálculo de subpressões em planos de descontinuidades de fundações de maciços basálticos". Anais do VI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro.

[11]. CRUZ, P. T.; BARBOSA, R. G. (1981) – "Critérios de cálculo de subpressões e de estabilidade de barragens de gravidade de concreto". Anais do VI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Salvador.

[12]. GUTSTEIN, D. (2011) – Projeto de Estruturas de Barragens de Gravidade de Concreto por Meio de Métodos Computacionais: Visão Geral e Metodologia. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[13]. INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD (1994) – Computer Analysis for Concrete Dams – Finite Element, Non-linear, and Dynamic

Analyses. Bulletin 93. Paris.

[14]. ROYET, P.; BLIVET, J. C.; BOURDAROT, E.; BÉSANGER, Y.; CARVAJAL, C.; PEYRAS, L. (2009) – "Probabilistic Assessment Methods Applied to the Structural Safety of Concrete Gravity Dams". Proceedings of the CIGB/ICOLD Annual Meeting, Brasília.

[15]. LECLERC, M.; LÉGER, P.; TINAWI, R. (2003) – "Computer Aided Stability Analysis of Gravity Dams – CADAM". Advances in Engineering Software, v. 34, p. 403–420.

[16]. ROCHA, M. (1974) – "Influence of Foundation Deformability on the Stress State of Concrete Dams". Proceedings of the Symposium on Criteria and Assumptions for Numerical Analysis of Dams, Swansea. apud GUTSTEIN, D. [12].

[17]. ROCHA, M. (1977) – "New Techniques in Deformability Testing of In-situ Rock Masses". Proceedings of the Symposium on Determination of the In-situ Modulus of Deformation of Rock, Denver. apud GUTSTEIN, D. [12].

[18]. GAP/UFSC/FEESC; TRACTEBEL ENERGIA (2007) – Desenvolvimento de Critérios de Auscultação, Instrumentação e de Projeto Civil visando a Segurança de Barragens. Relatório de conclusão do projeto de P&D (divulgação restrita), Florianópolis.

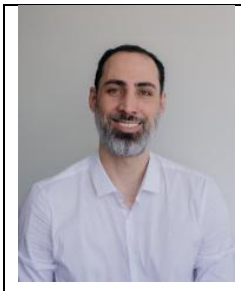
[19]. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE (1994) – Rock Foundations: Engineering and Design. EM 1110-1-2908, Department of the Army, Washington D.C.

[20]. BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 set. 2010. Alterada pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. [2]. U.S. BUREAU OF RECLAMATION, U. (1976) – “Design of Gravity Dams: A Water Resources Technical Publication”, Anais do Departamento do Interior dos Estados Unidos, Engenharia de Estruturas Civis e Recursos Hídricos, Volume 1, Denver.



Saulo Silvestre DE CASTRO

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (2009), mestrado em Engenharia de Estruturas pela Universidade Federal de Minas Gerais (2013) e atualmente é doutorando em Engenharia de Estruturas pela Universidade Federal de Minas Gerais. Trabalha como Gerente Técnico de Infraestrutura na DF+ Engenharia.

	**David Assis SOUSA** Graduação em Sistema da Informação pela PUC-Minas; graduação em Engenharia Civil pela PUC-Minas onde obteve conclusão com Honra ao Mérito e especialista em Engenharia de Estruturas pela FUMEC. Possui interesse por projetos estruturais com foco em estruturas de concreto, gestão da interface de projetos vs. execução e utilização de métodos computacionais para otimização e implantação de soluções.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.4
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

MODELAGEM SAZONAL PARA DEFINIÇÃO DE LIMITES DE SEGURANÇA EM PIEZÔMETROS

Maria Luiza FAVARÃO VIEIRA
Engenheira Civil - Elera Renováveis

Ana Paula ANTUNES DE LIMA
Gerente de Engenharia - Elera Renováveis

Camila XAVIER DO COUTO
Engenheira Civil - Elera Renováveis

Guilherme ABREU ROCHA DE SOUZA
Coordenador Segurança de Barragens e Engenharia Civl - Elera Renováveis

Gustavo RIBEIRO LOPES

Engenheiro Civil - Elera Renováveis

RESUMO

Em barragens de terra e enrocamento, piezômetros, especialmente os instalados a montante ou próximos ao eixo, apresentam forte correlação com as oscilações sazonais do nível de montante, o que pode mascarar anomalias relevantes e dificultar a definição de níveis de referência confiáveis. Os métodos tradicionais, que simulam colmatação do sistema de drenagem, redução de permeabilidade do maciço ou outras condições de contorno para elevar artificialmente o nível freático, tornam-se menos eficazes quando o comportamento do instrumento é dominado por fatores hidrológicos externos. Para superar essa limitação, este trabalho apresenta uma metodologia baseada em modelagem sazonal por aproximação senoidal, capaz de representar o comportamento típico de longo prazo do piezômetro. A abordagem consiste em ajustar aos dados históricos uma senoide fundamental que descreve a variação periódica do nível piezométrico em resposta ao regime hidrológico. O resíduo entre o valor observado e o valor ajustado é então analisado estatisticamente. Com base no desvio-padrão amostral desses resíduos, são definidos limites de Atenção, Alerta e Emergência, que representam desvios gradativamente mais significativos em relação ao comportamento esperado. Essa técnica reduz a probabilidade de falsos alarmes produzidos por flutuações sazonais normais. Assim, a metodologia contribui para o aprimoramento do monitoramento piezométrico, oferecendo critérios de segurança mais robustos e sensíveis para a gestão de barragens.

ABSTRACT

In earth and rockfill dams, piezometers installed upstream or near the dam axis exhibit a strong correlation with seasonal fluctuations in the upstream reservoir level, which may mask relevant anomalies and hinder the definition of reliable reference levels. Traditional methods, which simulate drainage system clogging, reduction in embankment permeability, or other boundary conditions to artificially raise the phreatic surface, become less effective when the instrument behavior is dominated by external hydrological factors.

To overcome this limitation, this study presents a methodology based on seasonal modeling using a sinusoidal approximation, capable of representing the typical long-term behavior of the piezometer. The approach consists of fitting a fundamental sine function to historical data in order to describe the periodic variation of the piezometric level in response to the hydrological regime. The residual between the observed value and the fitted value is then statistically analyzed. Based on the sample standard deviation of these residuals, control limits for Attention, Alert, and Emergency levels are defined, representing progressively more significant deviations from the expected behavior.

This technique reduces the likelihood of false alarms caused by normal seasonal fluctuations. Therefore, the methodology contributes to improving piezometric monitoring by providing more robust and sensitive safety criteria for the management of earth and rockfill dams.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de barragens constitui um dos pilares fundamentais para a garantia da segurança estrutural e operacional dessas obras, sendo realizado por meio da instrumentação geotécnica e análise contínua de parâmetros hidráulicos, mecânicos e deformacionais. A instrumentação permite acompanhar o comportamento do maciço, da fundação e do reservatório ao longo do tempo, fornecendo informações essenciais para a tomada de decisões e para a prevenção de falhas [1].

Entre os diferentes instrumentos empregados, os piezômetros destacam-se como dispositivos fundamentais para a medição de pressões intersticiais e níveis piezométricos, permitindo avaliar o regime de percolação, a eficiência dos sistemas de drenagem e a evolução de processos como piping e colmatação. A interpretação adequada dessas leituras é essencial para identificar alterações no comportamento hidráulico do maciço e antecipar condições potencialmente críticas [2].

Entretanto, em barragens de terra e enrocamento, piezômetros instalados a montante ou próximos ao eixo frequentemente apresentam forte correlação com as variações do nível do reservatório. Essas oscilações, muitas vezes sazonais, influenciam diretamente as pressões medidas e podem mascarar anomalias relevantes, dificultando a distinção entre comportamentos naturais e alterações estruturais. Esse fenômeno é bem documentado em estudos de comportamento hidráulico, nos quais a propagação de ondas de pressão em aquíferos e maciços resulta em respostas piezométricas periódicas associadas ao regime hidrológico [3][4].

Tradicionalmente, a análise de dados piezométricos em barragens baseia-se na comparação com níveis de referência previamente definidos ou com cenários simulados que consideram modificações nas condições de contorno, como colmatação do sistema de drenagem ou redução de permeabilidade. No entanto, quando o comportamento do instrumento é dominado por fatores hidrológicos externos, esses métodos tornam-se limitados, pois não conseguem dissociar adequadamente a componente sazonal do sinal observado [5].

Nesse contexto, modelos estatísticos e empíricos têm sido amplamente empregados para análise de séries históricas de instrumentação, destacando-se modelos do tipo HST (Hydrostatic–Seasonal–Time), que incorporam explicitamente a influência do tempo e das condições hidrológicas na resposta dos instrumentos. Tais abordagens permitem reproduzir o comportamento esperado do sistema e identificar desvios significativos associados a alterações físicas no maciço [6].

Diante disso, este trabalho propõe a utilização de uma abordagem baseada em modelagem senoidal para representar o comportamento sazonal dos níveis piezométricos. A metodologia consiste no ajuste de uma função harmônica aos dados históricos, permitindo a separação entre o comportamento periódico esperado e os desvios associados a possíveis anomalias geotécnicas. A análise estatística dos resíduos fornece critérios objetivos para definição de níveis de controle e apoio à tomada de decisão.

Essa abordagem contribui para o aprimoramento do monitoramento piezométrico, reduzindo a ocorrência de falsos alarmes e aumentando a sensibilidade na detecção

precoce de alterações relevantes, o que representa um avanço significativo na gestão da segurança de barragens.

2 METODOLOGIA

A metodologia foi aplicada a uma barragem de terra homogênea. A estrutura possui sistema de instrumentação geotécnica densamente distribuído ao longo do maciço e fundação, permitindo o acompanhamento contínuo do comportamento hidráulico da barragem.

A aplicação da metodologia foi direcionada aos instrumentos que apresentaram comportamento sazonal claramente definido. A identificação desse padrão foi realizada por meio da análise das séries históricas de leituras, observando-se a recorrência de ciclos anuais de elevação e redução do nível piezométrico.

Foram considerados aptos à aplicação do modelo os instrumentos que apresentaram comportamento estável ao longo do histórico analisado e oscilações periódicas repetitivas associadas às diferentes épocas do ano.

Para os instrumentos que não apresentaram padrão sazonal bem definido, permaneceram sendo adotados os critérios convencionais utilizados pelo empreendimento. Nesses casos, os níveis de controle foram definidos a partir de análises geotécnicas tradicionais baseadas em fatores de segurança mínimos admissíveis ou por critérios estatísticos simplificados.

Inicialmente foi realizada uma avaliação do histórico de leituras de todos os piezômetros monitorados na estrutura. Dentre os instrumentos avaliados, 17 apresentaram comportamento estável e padrão sazonal claramente definido, caracterizado por oscilações recorrentes associadas às diferentes épocas do ano e ao regime hidrológico do reservatório. Sendo esse elegíveis para a aplicação

Durante a análise não foram identificadas inconsistências relevantes que justificassem a exclusão de registros ou a necessidade de procedimentos de correção, interpolação ou preenchimento de dados faltantes. Dessa forma, o ajuste do modelo foi realizado utilizando-se integralmente as leituras históricas validadas disponíveis para o instrumento analisado.

2.1 Tratamento dos Dados

Inicialmente, a série histórica de leituras piezométricas é convertida em uma variável temporal contínua, expressa em anos, com o objetivo de permitir a representação do comportamento sazonal ao longo do tempo. Essa transformação é realizada conforme a Equação (1):

As leituras piezométricas são inicialmente convertidas em uma variável temporal contínua, expressa em anos:

$$t_i = \frac{(\text{Data}_i\text{-Data}_0)}{365} \quad (1)$$

Onde:

t_i - representa o tempo normalizado associado à i-ésima observação;

t_i representa o tempo normalizado;

Data_0 é a data inicial da série histórica;

Data_i corresponde à data da ultima leitura;

2.2 Modelagem Senoidal

O comportamento do nível piezométrico é representado por um modelo harmônico de primeira ordem, baseado em funções senoidais, conforme a Equação (2):

$$h(t) = a + b.\sin(2\pi t) + c.\cos(2\pi t) \quad (2)$$

onde:

$h(t)$ é nível piezométrico (m)

a é o valor médio da série

b, c = são os coeficientes da oscilação sazonal

t é o tempo em anos

2.3 Ajuste por Mínimos Quadrados

Os coeficientes a, be $c$são determinados por meio do método dos mínimos quadrados, que consiste na minimização do erro quadrático entre os valores observados e os valores estimados pelo modelo:

$$\min = \sum_{i=1}^{n} (h_i - h(t_i))^2 \quad (3)$$

O modelo pode ser reescrito na forma matricial:

$$H = X \cdot \beta \quad (4)$$

onde:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \sin(2\pi t_1) & \cos(2\pi t_1) \\ 1 & \sin(2\pi t_2) & \cos(2\pi t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.4 Análise dos Resíduos

Os resíduos são definidos como a diferença entre os valores observados e os valores estimados pelo modelo:

$$r_i = h_{obs,i} - h_{aj,i} \quad (6)$$

O desvio padrão dos resíduos é calculado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n\text{-}1}\sum_{i=1}^{n}(r_i\text{-}\bar{r})^2} \quad (7)$$

onde:

- r_i é o resíduo da i-ésima observação;
- $\bar{r}$ é a média dos resíduos;
- n é o número de observações

2.5 Definição de Limites de Controle

Com base no desvio padrão dos resíduos, foram definidos limites de controle para a avaliação do comportamento piezométrico, conforme:

- Atenção: $| r | \leq 2\sigma$
- Alerta: $2\sigma < | r | \leq 3\sigma$
- Emergência: $| r | > 4\sigma$

3 RESULTADOS

A metodologia proposta foi aplicada à série histórica do piezômetro compreendendo o período de abril de 2016 a abril de 2026, permitindo a análise do comportamento piezométrico ao longo de aproximadamente dez anos de monitoramento contínuo.

A modelagem senoidal ajustada aos dados demonstrou boa capacidade de representar o comportamento sazonal da série. A comparação entre os valores observados e os valores estimados evidenciou adequada aderência do modelo, indicando que as oscilações periódicas associadas ao regime hidrológico foram satisfatoriamente capturadas.

O modelo obtido apresentou valor médio de aproximadamente 469,79 m, representado pelo parâmetro a, enquanto os coeficientes sazonais b e c foram estimados em 0,493 m e 0,118 m, respectivamente. Esses valores refletem a influência significativa das variações do nível de montante sobre o comportamento piezométrico, característica típica de instrumentos localizados em regiões próximas ao reservatório.

A análise dos resíduos, obtidos a partir da diferença entre os valores observados e os valores ajustados pelo modelo, indicou comportamento aproximadamente estacionário, com distribuição centrada em torno de zero. O desvio padrão dos resíduos foi estimado em:

$$\sigma = 0{,}352\text{m}$$

Esse valor representa a variabilidade residual não explicada pelo modelo sazonal, estando associada a fatores como variações de curto prazo, ruídos de medição e possíveis alterações locais no regime de percolação.

Com base no desvio padrão dos resíduos, foram definidos limites de controle para avaliação do comportamento piezométrico. A maior parte das observações permaneceu dentro da faixa considerada normal (±2σ), indicando consistência operacional do instrumento ao longo do período analisado.

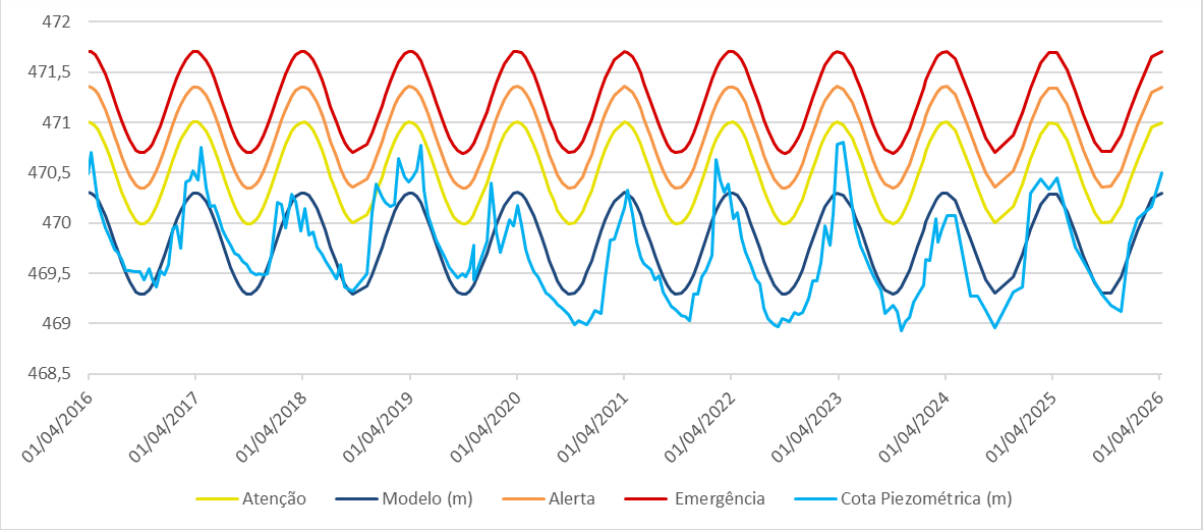


Figura 1 –Modelo harmônico e limites de referência calculados

Comparativamente aos métodos convencionais baseados em limites absolutos de nível piezométrico, a abordagem proposta demonstrou maior robustez na interpretação dos dados, reduzindo a influência das variações externas do nível do reservatório. Dessa forma, tornou-se possível separar o comportamento sazonal esperado de variações potencialmente associadas a alterações no maciço.

Os resultados obtidos confirmam que a modelagem senoidal constitui uma ferramenta eficaz para análise de séries piezométricas influenciadas por fatores hidrológicos, contribuindo para o aumento da confiabilidade do monitoramento e para a melhoria na detecção de anomalias reais.

4 DISCUSSÃO

A metodologia proposta demonstrou desempenho satisfatório na representação do comportamento piezométrico sazonal, sendo particularmente eficaz para séries históricas que apresentam variações periódicas bem definidas ao longo do tempo. Nesse contexto, modelos senoidais simples tendem a apresentar maior aderência quando aplicados a instrumentos cujo comportamento é fortemente influenciado por oscilações hidrológicas regulares, como variações do nível do reservatório.

Dessa forma, destaca-se que o desempenho da metodologia está diretamente relacionado à qualidade do padrão sazonal presente na série de dados. Instrumentos que apresentam comportamento irregular, ruído elevado ou ausência de periodicidade bem caracterizada podem demandar abordagens mais complexas ou adaptações do modelo proposto.

Um aspecto importante a ser considerado durante a aplicação prática do método refere-se aos limites de controle definidos a partir dos resíduos. Recomenda-se que os níveis de Atenção, Alerta e Emergência estabelecidos não extrapolem valores

fisicamente incompatíveis com o sistema hidráulico, como o nível máximo operacional do reservatório (nível *max maximorum*). Essa verificação é fundamental para garantir coerência entre os resultados estatísticos e as condições reais de operação da barragem.

A aplicabilidade da metodologia não se restringe exclusivamente a piezômetros. Existe potencial para sua utilização em outros instrumentos de monitoramento geotécnico que também apresentam comportamento sazonal ou cíclico, como extensômetros de haste, medidores triortogonais de deslocamento e outros dispositivos sensíveis a variações ambientais ou hidrológicas. Contudo, nesses casos, podem ser necessárias adaptações na modelagem, especialmente quanto à forma funcional adotada e à interpretação física dos parâmetros, de modo a garantir consistência técnica na análise dos dados.

Outro ponto relevante refere-se à interpretação dos desvios identificados. A metodologia proposta tem como objetivo principal melhorar a detecção de anomalias no padrão de leituras, proporcionando maior sensibilidade na identificação de variações atípicas. No entanto, é fundamental destacar que tais desvios não indicam, obrigatoriamente, risco estrutural. Os limites de controle definidos são de natureza estatística e não possuem relação direta com o fator de segurança da estrutura, devendo ser utilizados como ferramenta de apoio à análise e não como critério isolado de decisão.

Um dos principais benefícios da abordagem proposta é a sua facilidade de implementação e replicabilidade. A metodologia pode ser aplicada utilizando ferramentas computacionais simples, como planilhas eletrônicas (Excel), sem a necessidade de softwares avançados ou conhecimentos especializados em programação, como Python, MATLAB ou linguagens de análise de dados. Esse fator favorece sua adoção em rotinas operacionais de monitoramento, especialmente em contextos onde há limitação de recursos ou infraestrutura analítica.

Entretanto, apesar das vantagens apresentadas, a aplicação da metodologia não dispensa, em hipótese alguma, a análise crítica por parte de um profissional qualificado. A interpretação dos resultados deve considerar diversos fatores, tais como:

- posição de instalação do instrumento;
- características geotécnicas do maciço e da fundação;
- qualidade e consistência da série histórica;
- comportamento esperado da estrutura;
- condições operacionais do reservatório.

Do ponto de vista prático, verificou-se que a utilização dos resíduos em substituição aos valores absolutos de nível piezométrico proporcionou uma interpretação mais consistente das leituras. Enquanto os critérios tradicionais tendem a refletir diretamente os efeitos da sazonalidade hidrológica, a metodologia proposta concentra a análise nas variações não explicadas pelo comportamento periódico esperado. Como consequência, reduziu-se a influência das oscilações naturais do reservatório sobre os níveis de controle, tornando os desvios observados potencialmente mais representativos de alterações reais das condições de percolação ou drenagem.

Outro benefício observado foi a maior estabilidade dos limites de controle ao longo do período analisado. Com a adoção da modelagem sazonal, os critérios passaram a ser vinculados à variabilidade residual do instrumento, proporcionando maior uniformidade na avaliação das leituras e reduzindo a probabilidade de interpretações associadas exclusivamente às flutuações hidrológicas normais.

A experiência obtida neste estudo também demonstrou que a etapa de seleção dos instrumentos é determinante para o sucesso da metodologia. Os melhores resultados foram observados em piezômetros que apresentavam padrão sazonal claramente definido, comportamento estável ao longo do tempo e forte influência das condições hidrológicas do reservatório. Nessas situações, a componente periódica representa parcela significativa da variabilidade total das leituras, justificando a utilização de modelos harmônicos para descrever o comportamento esperado.

Assim, a metodologia deve ser utilizada como ferramenta complementar de apoio à tomada de decisão, integrada a um processo mais amplo de avaliação da segurança de barragens, que envolva conhecimento técnico especializado e análise multidisciplinar.

5 CONCLUSÕES

A metodologia proposta demonstrou ser uma alternativa eficiente para o tratamento de séries piezométricas influenciadas por variações sazonais, permitindo a separação clara entre o comportamento periódico esperado e desvios potencialmente relevantes. A aplicação do modelo senoidal possibilitou a definição de um padrão de referência estável, reduzindo a interferência direta das oscilações do nível de montante na interpretação dos dados.

Os resultados indicam que o uso de resíduos como parâmetro de análise fornece uma base consistente para o estabelecimento de limites de controle estatísticos, contribuindo para a identificação mais sensível de alterações no comportamento do instrumento. Essa abordagem se mostrou particularmente adequada para séries com padrão sazonal bem definido, ampliando a confiabilidade do monitoramento.

Além disso, destaca-se a simplicidade e a facilidade de implementação da metodologia, que pode ser aplicada com recursos computacionais acessíveis, favorecendo sua incorporação em rotinas operacionais de acompanhamento de barragens.

Por outro lado, a aplicação do método requer avaliação criteriosa quanto à qualidade dos dados e às características do instrumento e da estrutura, de modo a assegurar a coerência técnica dos resultados obtidos. Dessa forma, sua utilização deve ser integrada à análise especializada, não substituindo o julgamento engenheirado na avaliação da segurança da barragem.

6 PALAVRAS-CHAVE

Piezometria; Limites de referência; Modelagem harmônica; Monitoramento geotécnico; Segurança de barragens.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MIZUNO, M.; HIROSE, T. (2010) – “Instrumentation and Monitoring of Dams and Reservoirs”, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Japão.

[2] PRASAD, R.; DIXIT, M. (2020) – “Performance Monitoring of Dams through Piezometers: A Case Study”, International Journal of Engineering and Applied Sciences, Índia.

[3] MONTANA DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES (2023) – “Analysis of Dam Instrumentation as part of a Five-Year Dam Evaluation”, Technical Note 10, Estados Unidos.

[4] HERRERO-PACHECO, J.; CARRASCO, J.; CARRASCO, P. (2025) – “Analysis of Piezometric Fluctuations by Hydrogeological Methods”, Water Journal, Volume 17, Espanha.

[5] DOERGE, B. (2014) – “Using Piezometers to Predict Extreme Conditions at Dams”, Proceedings of Dam Safety Conference, ASDSO, Estados Unidos.

[6] TOUILEB, B.; CÔTÉ, P.; POPOVICI, A. (2004) – “Analysis of Flow and Piezometry by Means of Statistical Models”, Canadian Dam Association Conference, Canadá.



Maria Luiza FAVARÃO VIEIRA

Engenheira civil formada pela UNESP e pós-graduada pela PUC-Minas em Geotecnia, com atuação em segurança de barragens, análises de estabilidade, monitoramento geotécnico e gestão de riscos, com experiência em elaboração de relatórios para suporte à tomada de decisão.



Ana Paula ANTUNES DE LIMA

Engenheira civil formada pela PUC-PR, especialista em Segurança de Barragens e MBA em Gestão de Negócios no Setor Elétrico pelo IBMEC. Certificada PMP®, possui mais de 12 anos de experiência em energia renovável, atuando em gestão de riscos, monitoramento geotécnico, implantação de PSB e PAE, além de coordenação de equipes e interface com órgãos reguladores e comunidades.

	**Camila XAVIER DO COUTO** Engenheira Civil formada pela UFGD, com pós-graduação em Engenharia Geotécnica pela PUC Minas e MBA em Gestão de Projetos pela USP. Possui mais de 5 anos de experiência em segurança de barragens de terra, enrocamento e concreto nos setores de mineração e energia, com forte atuação em gestão de riscos e desenvolvimento de planos de ação.
	**Guilherme ABREU ROCHA DE SOUZA** Engenheiro Civil formado pela UVA – Universidade de Veiga de Almeida, MBA em Gestão de Negócios no Setor de Energia e pós-graduando pela IPOS - em Geotecnia. Atuação de mais de 10 anos no setor de energia com foco em gestão de ativos de infraestrutura e segurança de barragens.
	**Gustavo RIBEIRO LOPES** Engenheiro Civil formado pela UVA – Universidade de Veiga de Almeida, pós-graduado pelo IDD - em Segurança de Barragens. Atuação em segurança de barragens, análises de estabilidade, monitoramento e elaboração de relatórios técnicos.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

MONITORAMENTO DE GRADIENTES NO TRECHO DA FUNDAÇÃO EM TERRAÇO ALUVIONAR DA BARRAGEM DE PORTO PRIMAVERA

Teresa Cristina FUSARO
Engenheira Civil MSc. – Fusaro Engenharia e Consultoria Ltda.

Túlio Marcos de VASCONCELLOS Filho
Engenheiro Civil Esp.– Enemax Engenharia e Consultoria Ltda.

Eric Silveira NUNES
Engenheiro Civil – Enemax Engenharia e Consultoria Ltda.

Emanuelle Vitória Menezes MAGALHÃES
Graduanda em engenharia civil – Enemax Engenharia e Consultoria Ltda.

Mariana Alves TRASKURKEMB
Engenheira Civil MSc. – Auren Energia

RESUMO

A barragem de Porto Primavera possui parte da estrutura assente em um terraço aluvionar, condição esta determinante no projeto das estruturas e na implantação de uma robusta rede de instrumentação.

Com o objetivo de obter alertas dados pelos instrumentos no caso de eventuais situações anômalas e potencialmente de risco, foram implementados valores de controle para os instrumentos na fase de projeto e, posteriormente, de forma inovadora para a época, valores de referência estatísticos com base no histórico das leituras até 2006.

Visando evoluir no monitoramento das estruturas, e agora com um histórico mais longo de operação, o presente artigo apresenta uma nova proposta para o reestudo dos valores de controle para a piezometria instalada na fundação em terraço aluvionar, considerando os gradientes máximos admissíveis associados ao modo de falha erosão regressiva pela fundação, entendido como de destaque para o caso em questão.

ABSTRACT

Porto Primavera dam has part of its foundation on an alluvial terrace, a decisive condition in the structures design and in the implementation of a robust instrumentation network.

To obtain alerts from the instruments in case of any anomalous and potentially risky situations, control values were implemented for the instruments during the design

phase and, subsequently, in an innovative way at that time, statistical reference values based on the history of readings up to 2006.

To improve the structural monitoring, and now after a longer operational period, this article presents a new approach to restudy the control values for the piezometry installed in the alluvial terrace foundation, considering the maximum allowable gradients associated with the regressive erosion through the foundation failure mode, understood as the most prominent for the case in question.

1. A BARRAGEM DE PORTO PRIMAVERA

A UHE Porto Primavera está localizada entre os municípios de Batayporã e Anaurilândia pelo estado de Mato Grosso do Sul e Rosana em São Paulo, a 28 km da confluência com o Rio Paranapanema.

O empreendimento, com potência instalada de 1.540 MW, projetado pela Themag e construído pela Camargo Corrêa, possui a mais extensa barragem de terra do Brasil. O enchimento do reservatório foi realizado em duas fases, a primeira iniciada em 1998, com o início da operação em 1999, e a segunda concluída em 2001.

A UHE Porto Primavera é composta pelas estruturas da barragem de terra, espigão de concreto, vertedouro, tomada d'água, casa de força, escada de peixes e eclusa.

O vertedouro é do tipo superfície de descarga controlada, possuindo 16 vãos, com soleira na el. 237,00m. A capacidade máxima de descarga de projeto é de 52.800 m³/s.

O circuito de geração é constituído pelas estruturas da tomada d'água e casa de força. A estrutura da tomada d'água possui 18 blocos, cada um dotado de 3 vãos. A casa de força é do tipo abrigada, dotada de turbinas do tipo Kaplan, de eixo vertical.



Figura 1 – Arranjo geral das estruturas do empreendimento.
Fonte: Adaptado de Google Earth (2026).

Destaca-se a barragem de terra da margem direita, objeto deste artigo, que possui 38 m de altura na seção máxima e comprimento de 10.186 m na crista. É uma estrutura de terra homogênea dotada de sistema de drenagem interna composto por filtro vertical e tapete drenante. Devido a sua extensão e diferentes aspectos de fundação, foi dividida para fins de projeto nos trechos mostrados na Figura 2 e assim denominados:

Barragem Natural, Ombreira Direita, Terraço Aluvionar, Rio Baía, Páleo-Ilha, Planície do Rio Paraná e Barragem do Leito do Rio.



Figura 2 – Trechos da barragem de terra. Fonte: Adaptado de Google Earth (2024).

2. TRECHO DA FUNDAÇÃO EM TERRAÇO ALUVIONAR

Conforme [1], *"a barragem no Terraço Aluvionar é do tipo homogêneo em solo compactado contando com um tapete de solo compactado a montante.*

O sistema de drenagem interno é composto por um filtro vertical e um filtro horizontal não assente sobre a fundação e que deságua na trincheira drenante a qual, além, de receber as águas desse sistema, é o principal elemento de controle de percolação pela fundação.

O maciço compactado está assente sobre um pacote aluvionar com espessura média da ordem de 12 m, tendo sido removidos da fundação os materiais de baixa resistência ao cisalhamento e/ou muito deformáveis [...]."

Ao longo de toda a extensão da barragem no trecho do Terraço Aluvionar, foi construída uma trincheira drenante, parcialmente penetrante, cortando a porção superior do pacote aluvionar, com base assente em camada de areia lavada na fundação. Ao longo da trincheira, existe um tubo de concreto perfurado que coleta as águas captadas e as conduz até caixas de passagem espaçadas a cada 200 m, aproximadamente.

A partir dessas caixas, o deságue é realizado por meio de tubos lisos com diâmetro de 0,70 m, transversais ao eixo da barragem sob a berma do talude de jusante, berma esta que atua como pista da estrada da BR-376. Na saída dos tubos, foi instalado um medidor de vazão, cuja cota de vertimento foi estabelecida de modo a garantir a submersão dos elementos de drenagem da trincheira. Conforme o referido relatório, exige-se que o sistema esteja submerso para reduzir a possibilidade de colmatação por óxidos de ferro.

A Figura 3 apresenta a seção da estaca 117+0,00 m, com destaque para a trincheira drenante e a Figura 4 mostra o processo de construção da trincheira.

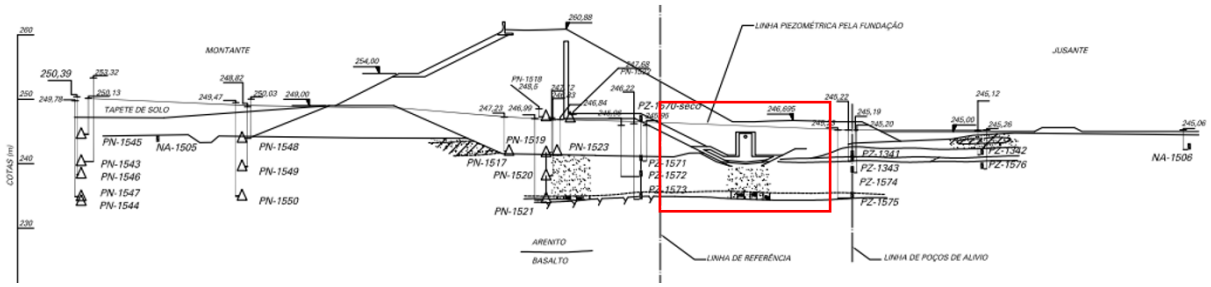


Figura 3 – Terraço Aluvionar – Instrumentação Estaca 117 + 00,00. Fonte: Cesp, [3].



Figura 4 – Construção da Trincheira Drenante. Fonte: Acervo do empreendedor.

Como segunda linha de drenagem, foi executada uma linha de poços de alívio a jusante da trincheira drenante. Os poços são totalmente penetrantes no pacote aluvionar de fundação e foram instalados com espaçamento médio de 15 m entre si, estendendo-se ao longo de todo o Terraço Aluvionar. Em seu topo foi instalada uma caixa de concreto de onde sai um tubo horizontal que conduz as águas coletadas além do pé da berma, com a instalação de válvulas de retenção na saída. Vale destacar que o espaçamento entre os poços foi reduzido em alguns trechos nos quais as pressões piezométricas na fundação superaram as expectativas de projeto.

Foram também executados furos de drenagem no basalto entre as estacas 15+0,00 m e 30+0,00 m, com espaçamento de 12 m, em média, motivados pelas subpressões verificadas a jusante da trincheira, com condução das águas coletadas de forma similar aos poços de alívio.

Por fim, em razão da existência de valetas de drenagem escavadas no terreno a jusante com o objetivo de coletar e direcionar as águas de chuva e percolação, cerca de dois anos após o final da 1ª fase de enchimento do reservatório, até a cota 253 m, foi observada a ocorrência de surgências a jusante do pé da barragem, tendo inclusive sido observados *sandboils*. Diante destas ocorrências foi implantado um plano diretor de drenagem das águas superficiais que contemplou a eliminação dos pontos baixos, aumentando o comprimento dos caminhos de percolação e reduzindo os gradientes.

Este plano foi posteriormente complementado com a execução de um pequeno aterro, numa faixa de aproximadamente 55 m a partir do pé de jusante, nos trechos onde se formava uma lâmina de água. Foram executadas canaletas de concreto ao longo do pé de jusante e canaletas transversais, para adequada condução da água até o canal escavado em solo executado a ~200m a jusante do pé da barragem.

Em função da incorporação do terrapleno de jusante ao projeto geotécnico da barragem, as saídas de drenagem, tanto de águas de percolação pelas fundações quanto as pluviais, tiveram que ser adaptadas em função das novas cotas estabelecidas. Analogamente, as saídas dos poços de alívio do aluvião e furos de drenagem do basalto também foram ajustadas em função dos terraplenos.

Esta solução apresentou resultados bastante satisfatórios no controle de gradientes do pé da barragem.

3. MONITORAMENTO DE PRESSÕES E GRADIENTES PELA FUNDAÇÃO

A fundação da barragem no trecho do Terraço Aluvionar é monitorada por 3 linhas de piezômetros de tubo aberto: a primeira sito a montante da trincheira drenante, a segunda a jusante da trincheira e a terceira a jusante do pé da barragem.

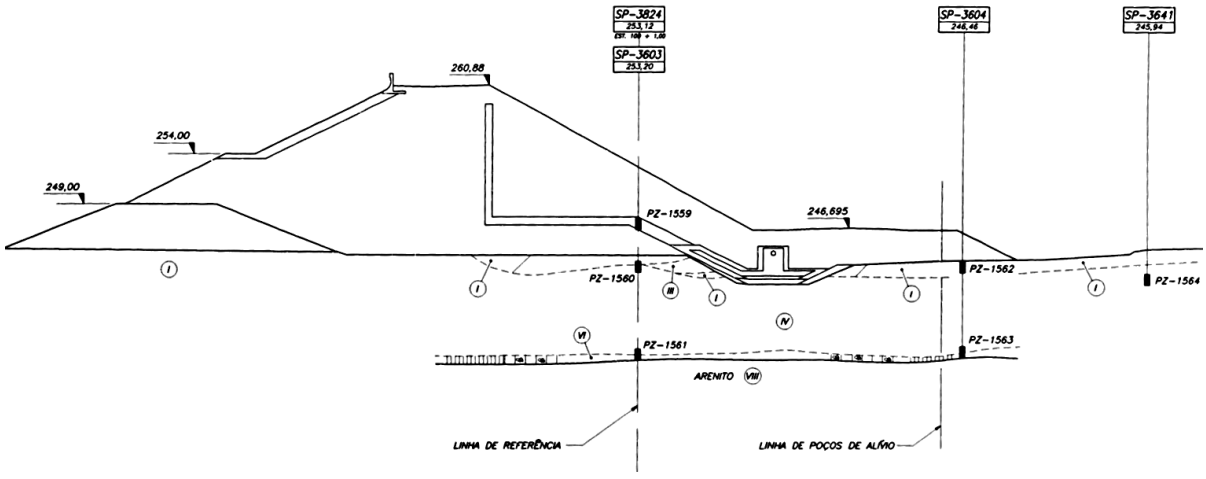


Figura 5 – Barragem de Terra – M.D. Seção Geológico-Geotécnica Instrumentação - EST. 100+0,00. Fonte: Cesp, [3].

Existe ainda uma instrumentação complementar instalada no alinhamento da segunda linha de piezômetros, como se vê na figura a seguir.



Figura 6 – Piezômetros de Tubo Instalados Próximo à Estaca 117.
Fonte: Acervo do empreendedor.

4. VALORES DE CONTROLE PARA A INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

4.1 Conceitos Gerais

O estabelecimento de “valores de controle” ou "valores de acompanhamento" para a instrumentação de barragens tem como finalidade estipular faixas ou limites dentro dos quais as medidas são esperadas, de forma a permitir o diagnóstico precoce de tendências adversas que possam sugerir o desenvolvimento de um eventual modo de falha. Representam tipicamente valores que refletem as premissas de projeto ou que indiquem alteração no padrão histórico de medidas [2].

Usualmente têm sido denominados “valores de controle determinísticos” quando obtidos por meio de modelos matemáticos ou em atendimento a critérios de projeto, importantes na avaliação do estado de segurança de uma estrutura e no seu controle ao longo do tempo, pois explicitam a concepção, as premissas e os objetivos do projeto. No entanto, tais modelos possuem limitações (conhecimento limitado das características de deformabilidade, resistência e permeabilidade dos materiais do aterro e da fundação, por exemplo) e estão dissociados de variações sazonais dos carregamentos de reservatório, temperatura e pluviometria.

Desta forma, “*raramente o comportamento das barragens e suas fundações obedece aos padrões previstos nos modelos”* [1]. Assim, deve-se buscar compreender por que o modelo se afastou da realidade e verificar se a realidade observada corresponde a uma situação satisfatória e segura.

Quando os modelos matemáticos não conseguem refletir adequadamente as condições de projeto, os valores obtidos numericamente diferem substancialmente dos observados em campo, ou os parâmetros medidos apresentam sazonalidade, podem ser empregados “valores de controle estatísticos ou de referência”. Também os modelos estatísticos apresentam fragilidades, uma vez que, na maioria das vezes, partem do pressuposto que a série histórica de medidas passadas representa o comportamento adequado das estruturas.

Tendo em mente estes elementos, os valores de controle para a instrumentação podem ser categorizados como apresentado na Figura 7.

Importante salientar que os valores de controle determinísticos e estatísticos não são excludentes e, como indicado pelo Corps of Engineers [4], podem ser empregados conjuntamente para permitir o acompanhamento adequado das estruturas.

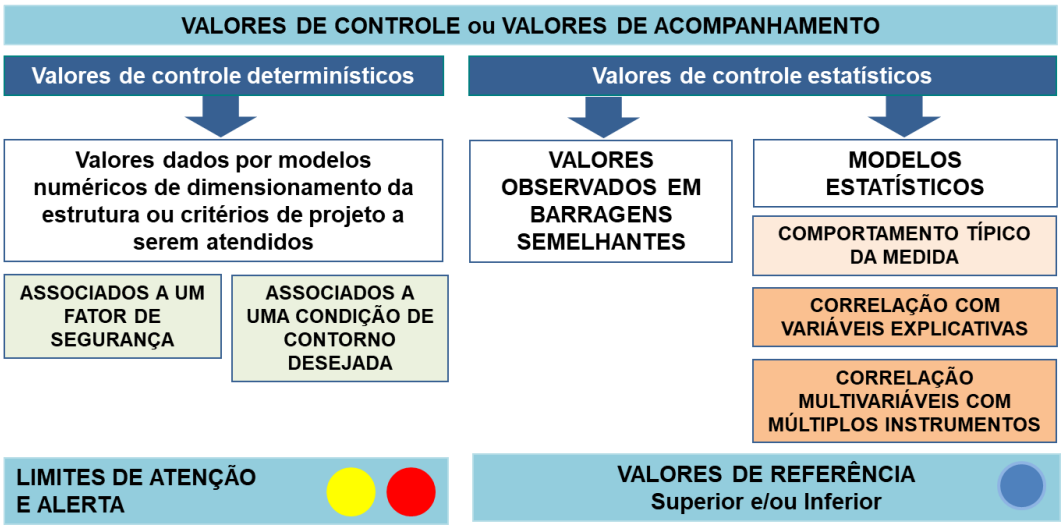


Figura 7 – Valores de controle ou valores de acompanhamento para instrumentação de barragens. Adaptado de [2].

4.2 Valores de Acompanhamento para a piezometria da barragem de Porto Primavera

Para a barragem de Porto Primavera, todos os instrumentos inicialmente possuíam valores de controle de projeto. De forma inovadora, 5 anos após o enchimento final do reservatório, a Themag [1] estabeleceu novos "valores de referência", agora com base no histórico das leituras, e que seriam mais representativos que aqueles fornecidos com bases em modelos e hipóteses da fase de projeto. O objetivo era obter um real alerta para a eventual ocorrência de situações anômalas e potencialmente de risco, permitindo a rápida tomada de ações se necessário.

Estes valores de referência superior e inferior foram definidos tomando a média das leituras históricas, mais ou menos, *"t student"* vezes o desvio padrão, como a seguir.

$$\text{Valor de Referência} = \text{Média} \pm t * \text{Desvio Padrão} \quad (1)$$

Onde: Média = Média dos valores das cotas piezométricas observadas durante o período de medições: 01/01/2004 a 20/02/2006

Desvio Padrão = Desvio Padrão dos valores das cotas piezométricas observadas

Valor do "*t student*" = variável em função do número de elementos das amostras

Tabela 1 - Valor “t student” em função do número de elementos das amostras [1].

No. elementos da amostra	*t student*
30 a 60	2,022
60 a 90	1,995
90 a 120	1,984
>120	1,96

Os valores de referência assim definidos passaram a ser empregados pelos leituristas para verificar, imediatamente após a coleta das leituras, se o valor se encontrava dentro da faixa considerada representativa do valor esperado para cada instrumento.

Visando evoluir ainda mais no monitoramento da segurança da barragem, em 2024 decidiu-se reestudar estes valores de referência, propondo eventuais melhorias ou mesmo novas metodologias frente a um histórico mais extenso de leituras.

Cabe destacar que os critérios para definição dos valores limites devem ser estabelecidos a partir da compreensão dos elementos de fundação, materiais e geometria do barramento, contatos com outras estruturas, variações sazonais dos níveis d’água de montante e de jusante, precisão dos equipamentos e modos de falha em potencial.

Desta forma, foram revisitados os critérios de projeto, análises de estabilidade e análises dos dados da instrumentação, buscando identificar os mecanismos de falha mais prováveis e como a instrumentação poderia apoiar esse monitoramento.

Estes registros pretéritos mostraram o foco do projeto nos fluxos de água pela fundação do trecho da barragem em estudo, se constituindo no principal ponto de interesse na proposição de uma nova metodologia para a definição dos valores de controle para a piezometria de fundação da barragem do Terraço Aluvionar.

5. EROSÃO INTERNA PELA FUNDAÇÃO DE BARRAGENS

5.1 O mecanismo de erosão interna

A erosão interna é definida como o processo de remoção de partículas de solo de estruturas de terra e suas fundações para jusante pelo fluxo de percolação [5]. Ocorre, portanto, quando as forças hidráulicas exercidas pela água percolando através dos poros ou aberturas em um maciço ou sua fundação são suficientes para destacar e transportar partículas para fora dessas estruturas.

A iniciação do processo é governada por uma coincidência desfavorável de suscetibilidade do material, condições de tensão e carga hidráulica, como mostrado na Figura 8.

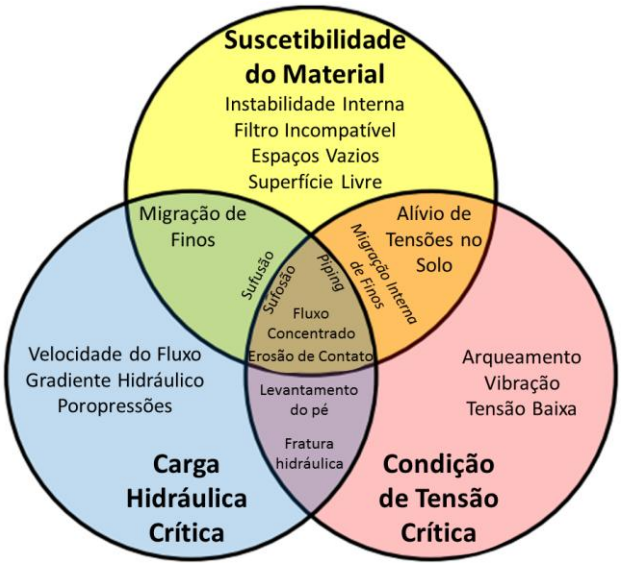


Figura 8 – Fatores que afetam a iniciação da erosão interna. Fonte: Adaptado de [6].

A suscetibilidade do material está relacionada ao potencial do solo em experimentar a perda de uma porção de sua fração mais fina, associada principalmente ao tamanho dos grãos e sua distribuição (curva granulométrica), além da plasticidade e dispersividade do solo.

A carga hidráulica crítica refere-se aos gradientes e velocidades do fluxo de percolação e sua capacidade de induzir o movimento de partículas.

Já a condição de tensão crítica está relacionada com a incapacidade de resistir à erosão interna em decorrência da magnitude das tensões efetivas.

A combinação desses três fatores dá origem ao desprendimento e transporte de grãos de solo, ou seja, ao início do mecanismo de erosão interna, seja por erosão regressiva, erosão por fluxo concentrado, erosão de contato ou sufusão/sufosão.

5.2 Erosão regressiva e gradientes críticos

Conforme [7], dentre os mecanismos de iniciação de erosão interna citados, a **erosão regressiva** envolve a remoção de partículas de solo no ponto de saída do fluxo de percolação pelo maciço ou sua fundação e pode ocorrer no caso da presença de uma camada contínua suscetível à erosão e da existência de um ponto de saída da percolação não filtrado (ou inadequadamente filtrado).

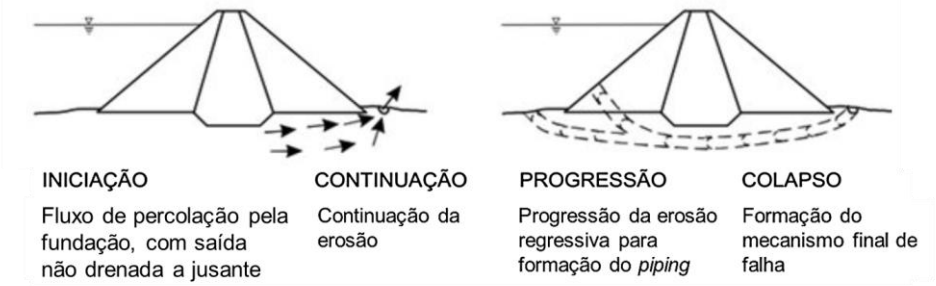


Figura 9 - Modelo conceitual do mecanismo de erosão regressiva pela fundação (adaptado de Fell *et al.*[8]).

O gradiente sob o qual a erosão regressiva pode iniciar depende principalmente do tamanho das partículas e da plasticidade dos solos considerados. Tipicamente, apenas materiais sem coesão ou de plasticidade muito baixa (Índice de Plasticidade IP inferior a cerca de 7) são considerados suscetíveis à erosão regressiva para os gradientes usuais em barragens convencionais de aterro e suas fundações.

Para solos com baixos coeficientes de uniformidade (Cu) e IP baixo, o gradiente necessário para avançar um tubo para o reservatório pode ser muito menor do que o gradiente crítico necessário para criar condições para tensão efetiva nula. Cabe destacar que o movimento de partículas pode ocorrer sob gradientes muito mais baixos para fluxos horizontais e descendentes do que no caso de fluxos ascendentes.

Em solos não coesivos, o gradiente de percolação capaz de iniciar o processo é dependente da densidade, tamanho, massa e uniformidade do tamanho das partículas. Solos compostos por partículas de areia fina uniformemente graduada sem coesão (normalmente classificados como SP ou SP-SM no Sistema Unificado de Classificação de Solos) são muito suscetíveis a serem destacadas devido à baixa massa das partículas e falta de atração interpartículas. Comparativamente, areias bem graduadas são mais resistentes a erosão regressiva porque as partículas maiores bloqueiam a migração das partículas menores, mais susceptíveis ao deslocamento pelo fluxo de percolação. Também os solos compactados ou aqueles naturalmente densos geralmente têm mais resistência à erosão regressiva [4].

Usualmente, gradientes críticos (i_{crit}), associados a uma condição de tensão efetiva nula, são dados por [8]:

$$i_{crit} = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (2)$$

Onde: γ_{sat} = Peso específico saturado do solo (kN/m³);

γ_w = Peso específico da água (kN/m³).

Considerando tal formulação, [8] indica a adoção de fatores de segurança entre 1,5 e 15 na relação entre gradiente de saída crítico e o gradiente previsto em projeto. Cedergren [10] recomenda a adoção de fatores de segurança entre 2,5 e 3,0 para gradientes de saída. Contudo, os gradientes máximos obtidos podem se mostrar elevados para certas situações, e podem não se aplicar a fluxos horizontais ou descendentes, em que o peso do solo não proporciona resistência à força de percolação da água contra o arraste de partículas.

Schmertmann (2000, *apud* [8]) desenvolveu, a partir de testes de erosão regressiva realizados na Universidade da Flórida para diversos solos granulares, desde areias finas a médias até areias grossas e cascalhos finos, um gráfico que permite correlacionar o coeficiente de uniformidade do material granular ($C_u=d_{60}/d_{10}$) com o gradiente crítico para desenvolvimento de um processo de erosão regressiva (i_{PMT}). A Figura 10 apresenta os resultados obtidos nos testes realizados, bem como a equação proposta para correlacionar C_u com i_{PMT}.

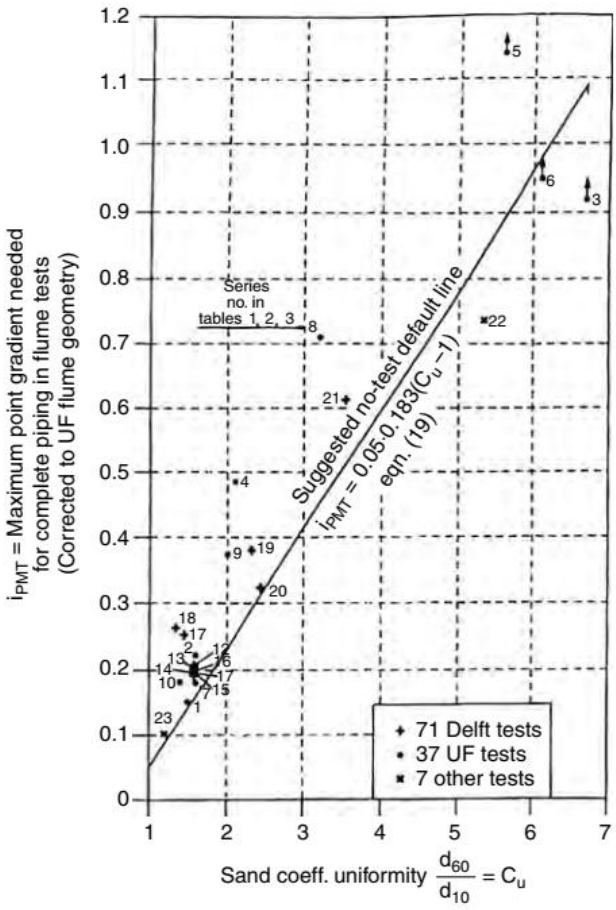


Figura 10 – Gradiente máximo pontual, i_{PMT} (*maximum point gradient*), necessário para erosão regressiva completa (início e progressão até uma saída não drenada) versus Coeficiente de uniformidade do solo [8].

6. MONITORAMENTO DOS GRADIENTES PELA FUNDAÇÃO

Considerando o contexto geológico-geotécnico da barragem do Terraço Aluvionar e presença em sua fundação de materiais suscetíveis a erosão interna, verifica-se que um dos pontos mais importantes a serem monitorados são os fluxos pela fundação e os gradientes que ocorrem sob a estrutura e na saída a jusante.

Conforme orientado na documentação de projeto, no caso da Barragem no Terraço Aluvionar de Porto Primavera os gradientes de saída a jusante devem ser mantidos abaixo de 0,15.

Por esse motivo, para refinar o acompanhamento dos fluxos pela fundação, optou-se por definir valores de controle determinísticos, conforme classificação apresentada na Figura 7, para a piezometria a partir de critérios de gradientes hidráulicos.

Considerando que o gradiente hidráulico (i) é uma grandeza adimensional obtida a partir da seguinte equação:

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{\text{Cota Piez.(A)} - \text{Cota Piez.(B)}}{L} \quad (3)$$

Onde: Δh = perda de carga hidráulica entre dois pontos A e B (m);

L = distância entre os pontos A e B (m).

Isolando a cota piezométrica, obtém-se:

$$\text{Cota Piez.}(A) = \text{Cota Piez.}(B) + i \times L \quad (4)$$

Partindo desta equação é possível definir os valores de controle dos piezômetros de tubo instalados a jusante da trincheira drenante considerando os gradientes máximos de saída de água, uma vez que todos possuem uma potencial saída não drenada.

Considerando a formulação indicada na equação 1, e os fatores de segurança indicados por [10], o gradiente máximo de saída permitido seria de 0,3 a 0,36, uma vez que, conforme ensaios realizados no material de fundação, a areia presente no trecho do Terraço Aluvionar (Unidade Geotécnica IV – Areia Lavada) possui peso específico de 19 kN/m³.

No entanto, como descrito anteriormente, estudos mais recentes sobre erosão interna questionam a aplicação deste conceito de gradiente "crítico" quando da existência de materiais pouco coesivos e uma potencial saída não-drenada. Casos históricos mostram que o processo de erosão interna pode ter início com gradientes bem mais baixos, o que foi confirmado em ensaios de laboratório desenvolvidos por Schmertmann.

O desafio no presente estudo foi definir o gradiente de saída admissível para os diferentes casos apresentados na fundação da barragem do Terraço Aluvionar, conforme pontos indicados na figura a seguir:

1. Gradiente de saída de fluxo ascendente pelas juntas da canaleta de jusante instalada sobre a fundação em aluvião;
2. Gradiente de saída de fluxo ascendente pelo aterro a jusante;
3. Gradiente na fundação do corpo da barragem.

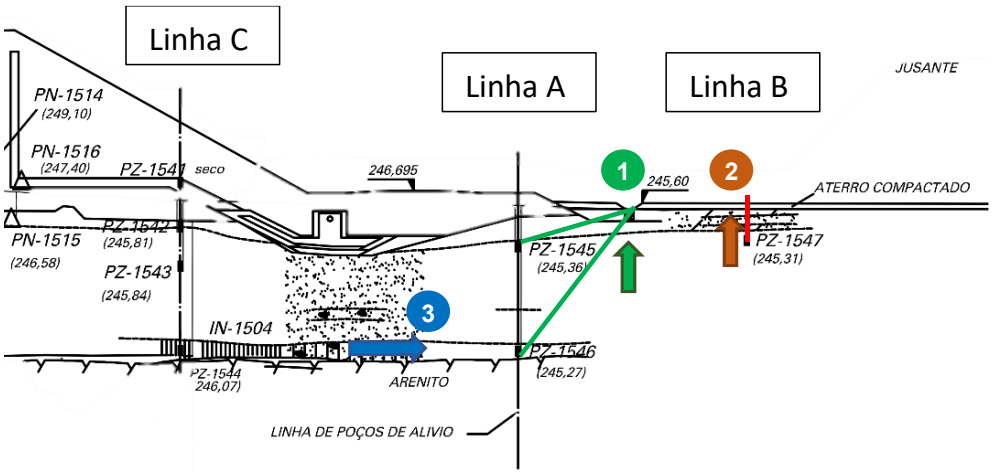


Figura 11 – Terraço Aluvionar – Linhas de instrumentação da Estaca 74 + 15,00 e possíveis pontos de saída de fluxos de percolação. Fonte: Cesp, [3].

6.1 Piezômetros imediatamente a jusante da trincheira drenante (Linha A)

Para os piezômetros imediatamente a jusante da trincheira drenante, mas a montante da canaleta de pé, foi considerada a possibilidade de saída de fluxo na diagonal por juntas da canaleta (ponto de saída 1), uma vez que esta encontra-se apoiada na camada de areia lavada presente na fundação, com granulometria bastante uniforme e, portanto, mais susceptível à erosão interna.

Dada a presença deste material não-coesivo no ponto de saída do fluxo, foi adotado o gradiente máximo pontual, i_{PMT}, conforme [8], levando em consideração o Coeficiente de Uniformidade (C_u) do material de fundação. Os diâmetros característicos foram obtidos das curvas granulométricas dos ensaios realizados na época de construção, apresentadas na Figura 12.

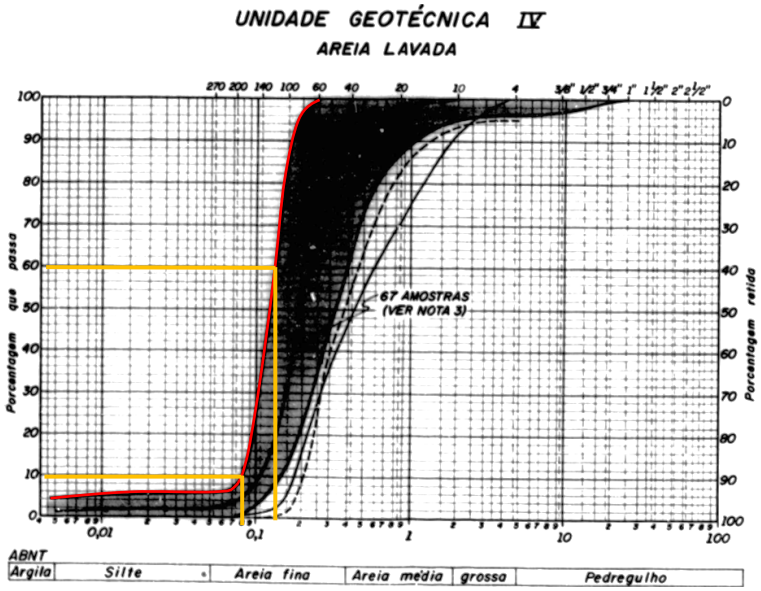


Figura 12 – Curvas Granulométricas da Areia Lavada (Unidade Geotécnica IV). Fonte: [11].

Conservadoramente, o Coeficiente de Uniformidade (C_u) foi calculado a partir da curva granulométrica destacada em vermelho na figura acima, cujo material é mais propenso a erosão interna, obtendo-se d_{60} = 0,125 mm, d_{10} = 0,08 mm e C_u = 1,625.

Assim, pode ser obtido o gradiente máximo pontual, i_{PTM}, necessário para o desenvolvimento do processo de erosão interna:

$$i_{PTM} = 0{,}05 + 0{,}183 \text{ x } (1{,}625 - 1) = 0{,}16 \qquad (5)$$

Este resultado corrobora os critérios de projeto definidos pela projetista. Sendo assim, para definição dos Valores de Controle dos piezômetros cujo material de saída do caminho de percolação é a areia lavada (Unidade Geotécnica IV), adotou-se 0,15 como gradiente de atenção, ou seja, o mesmo gradiente do critério de projeto da barragem.

6.2 Piezômetros a jusante do pé da barragem (Linha B)

Para os piezômetros instalados a jusante do pé da barragem, foi considerada saída vertical do fluxo pelo terreno de jusante (ponto de saída 2). Conforme descrito no item

2, o plano diretor de drenagem das águas superficiais na região de jusante da barragem previu a construção de um aterro de 0,5 m de espessura até cerca de 55 m a jusante do pé da barragem, de forma que a saída do caminho de percolação destes piezômetros se dá em material argiloso. Por esta razão, arbitrou-se um gradiente crítico igual a 0,3 para definição dos valores de controle, compatível com o gradiente crítico calculado a partir do peso submerso do material, considerando os fatores de segurança indicados por [10].

6.3 Piezômetros de fundação sob o maciço (Linha C)

Para os piezômetros de tubo aberto instalados a montante da trincheira drenante, houve a necessidade de uma abordagem distinta, uma vez que, apesar da importância do monitoramento dos gradientes pelo material aluvionar da fundação, o gradiente entre os pares de piezômetros das linhas C e B não está diretamente associado a um gradiente máximo admissível de saída.

Neste caso, optou-se pela definição de um valor de controle estatístico, considerando as séries históricas dos gradientes entre pares de piezômetros instalados em elevações semelhantes na fundação.

Os valores de controle para os piezômetros de montante (Linha C) foram estabelecidos partindo do Valor de Atenção do piezômetro de jusante (Linha B) instalado na mesma elevação, conforme indicado na Figura 13, acrescido de um gradiente multiplicado pela distância horizontal entre os instrumentos, a fim considerar a perda de carga existente entre o instrumento de montante e de jusante, ou seja:

$$\text{Valor de Atenção PZmont (m)} = \text{Valor de Atenção PZjus (m)} + \text{i} \times \text{L} \qquad (6)$$

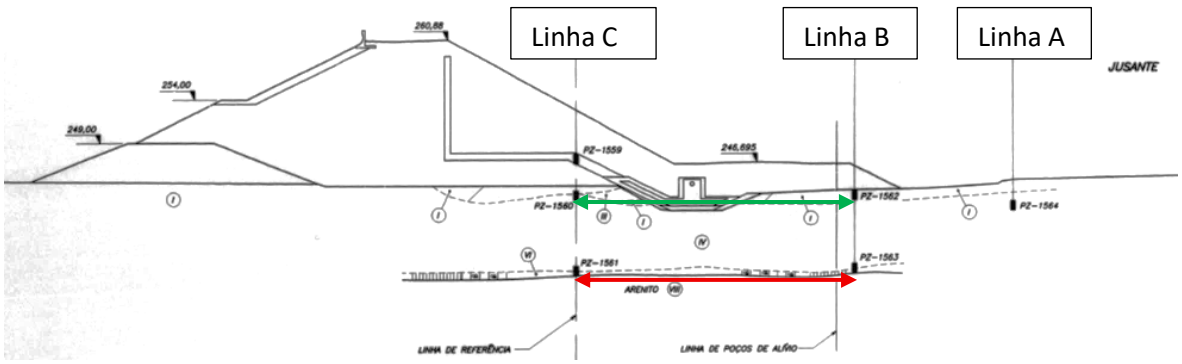


Figura 13 – Barragem de Terra – M.D. Seção Geológico-Geotécnica Instrumentação - EST. 100+0,00. Fonte: Adaptado de Cesp, [3].

O gradiente utilizado na equação acima foi definido como 0,04 m/m, tomado a partir da envoltória dos gradientes observados nas séries históricas para os pares de instrumentos ao longo de toda a extensão do Terraço Aluvionar.

A Figura 14 apresenta, como exemplo, a série histórica dos gradientes observados entre os PZs 1560 e 1562 e os PZs 1561 e 1563, localizados na estaca 100+00,00.

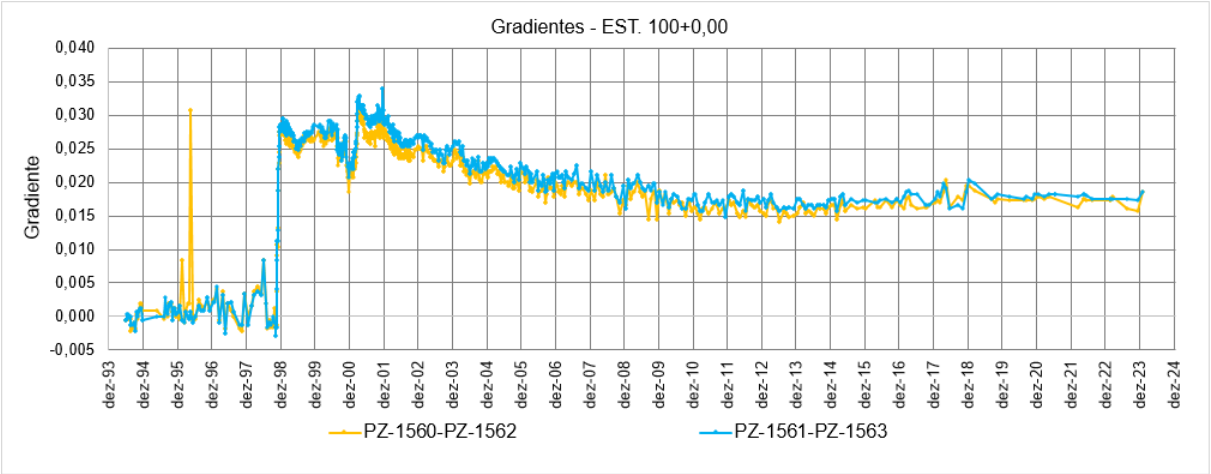


Figura 14 – Exemplo de gradiente entre pares de piezômetros instalados a montante e a jusante da trincheira drenante, respectivamente.

7. CONCLUSÕES

O presente artigo teve por objetivo apresentar uma nova proposta metodológica para a definição de valores de controle para os piezômetros instalados no trecho da barragem de terra da UHE Porto Primavera assente sobre um terraço aluvionar, considerando os gradientes máximos admissíveis, visando aprimorar o monitoramento do modo de falha de erosão regressiva pela fundação, entendido como de destaque para o local estudado.

Os gradientes máximos admissíveis para os piezômetros a jusante da trincheira seguiram a metodologia proposta por Schmertmann (2000 *apud* [8]), que apontou para gradientes compatíveis com aqueles definidos nos critérios de projeto da Themag. Para os instrumentos instalados na fundação da barragem, os valores de referência foram estabelecidos estatisticamente a partir da série histórica dos gradientes observados na fundação.

Os valores de controle assim definidos se mostram muito úteis no monitoramento da percolação pela fundação da barragem, pois permitem identificar mudanças no padrão das medidas indicativas da probabilidade de início de um processo de erosão regressiva, bem como de alterações no comportamento histórico dos gradientes, indicativos de alterações no regime de percolação pela fundação. Além disso, permitem que sejam automatizados com facilidade, possibilitando o alerta precoce de alterações que possam sugerir anomalias nas estruturas.

8. PALAVRAS-CHAVE

Instrumentação, valores de controle, erosão Interna, erosão regressiva, gradientes.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] THEMAG Engenharia (2007) – “Relatório de Análise da Instrumentação e Definição das Frequências e dos Valores Limites das Leituras da Instrumentação do Terraço Aluvionar”.

[2] VASCONCELLOS, T.M., RACHID, M.A., MARTINS, M.N.C., NUNES, E.S., FUSARO, T.C. (2023) - “Discussão sobre valores de controle para a Instrumentação”. XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens - CBDB. Foz do Iguaçu.

[3] CESP (2000) - “Relatório de Auscultação Civil”. ESCB-2020-PPR-SB-RT-003.

[4] USACE (2004) – “EM 1110-2-2300 - General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams. Appendix E - Process for Establishing Performance Parameters”. Disponível em: <https://www.publications.usace.army.mil /USACE-Publications/Engineer-Manuals/>. Acesso em 21/05/2023.

[5] ICOLD (2015) – “Bulletin 164 - Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundation”. Volume I. 142 f.

[6] USBR (2015) – “IV-4. Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations”. 134 f. Disponível em: <https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/ risk/BestPractices/Chapters/IV-4-20150617.pdf>. Acesso em 12/01/2017.

[7] FUSARO, T.C., ÁVILA, J.P., CAMPELLO, I.C., PIMENTA FILHO, M. A. (2017) - “Avanços no Entendimento do Risco de Erosão Interna”. II SGBR, Belo Horizonte.

[8] FELL, Robin; MACGREGOR, Patrick; STAPLEDON, David; BELL, Graeme; FOSTER, Mark. (2014) – “Geotechnical Engineering of Dams”. 2. ed. Boca Raton: CRC Press.

[9] USACE (1993) – “EM 1110-2-1901 - Seepage Analysis and Control for Dams”. Disponível em: <https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/ Engineer-Manuals/>. Acesso em 25/03/2026.

[10] CEDERGREN, H.R. (1989) - “Seepage, Drainage, and Flow Nets. 3. ed. New York: John Wiley & Sons.

[11] THEMAG Engenharia (1984) – “Curvas Granulométricas da Areia Lavada (Unidade Geotécnica IV)”. 13701-BT13-A1-0436-05752.



Teresa Cristina FUSARO

Engenheira Civil pela UFMG e Mestre em Geotecnia de Barragens pela UFOP, com mais de 40 anos de experiência na área de segurança e manutenção de barragens. Atuou na Cemig como engenheira (1986 a 2003) e como gerente de Segurança de Barragens e Manutenção Civil (2004 a 2013). Sócia-proprietária da Fusaro Engenharia e Consultoria Ltda, atualmente atua como consultora nas áreas de inspeção, instrumentação e análises de riscos de barragens.

	**Túlio Marcos de VASCONCELLOS Filho** Engenheiro Civil pela UFMG (2020) com pós-graduação em Engenharia Geotécnica pela PUC Minas (2023). Atua na Enemax Engenharia e Consultoria na área de Segurança de Barragens e de Estruturas e Geotecnia, na realização de estudos de estabilidade, definição de níveis de controle para instrumentação, inspeções de segurança, Planos de Segurança de Barragem (PSB) e Revisões Periódicas de Segurança (RPSB).
	**Eric Silveira NUNES** Eric Nunes Silveira é Engenheiro Civil pela UFMG (2023) e atua na Enemax Engenharia e Consultoria na área de Segurança de Barragens e Geotecnia. Atua na realização de estudos de estabilidade, inspeções de segurança, análises de instrumentação, relatórios de inspeção e Planos de Segurança de Barragem (PSB) e Revisões Periódicas de Segurança (RPSB).
	**Emanuelle Vitoria Menezes Magalhães** Graduanda em Engenharia Civil pela UFMG. Atua como estagiária na Enemax Engenharia e Consultoria na área de Segurança de Barragens e Geotecnia, com foco em análises de estabilidade de estruturas de terra e de concreto, auxiliando na elaboração de relatórios técnicos e memórias de cálculo.
	**Mariana Alves TRASKURKEMB** Tecnóloga em Hidráulica e Saneamento Ambiental (FATEC-SP), Engenheira Civil (FESP), Especialista em Segurança de Barragens (IDD) e Gestão de Projetos (FIA Business School). Mestra em Engenharia Fluvial (EP-USP), com pesquisa dedicada à sedimentação em reservatórios. Atua como Consultora de Engenharia na Auren Energia, contribuindo na O&M de ativos solares, eólicos e hidrelétricos.

BRAZILIAN COMMITTEE ON DAMS
VI SYMPOSIUM ON INSTRUMENTATION OF DAMS AND GEOTECHNICAL STRUCTURES
THEME IN.3
BELÉM, PA, BRAZIL – SEPTEMBER 24, 2026

ARTICLE TITLE

Geotechnical monitoring in copper tailings dam lifting works: reliability, climate and data integration challenges.

BARBOSA, Felipe Campolina
Geotechnical Manager - Vale Base Metal

COSTA, João Paulo Rodrigues
Geotechnical Manager - Vale Base Metal

SOUSA, Simone da Conceição
Geotechnical Engineer - Vale Base Metal

LEANDRO, Vanessa Cristina Pereira.
Geotechnical Engineer - Vale Base Metal

SILVA, Thiago Bleno
Automation Engineer - Vale Base Metal

ABSTRACT

Tailings dams in the process of active lift present unique geotechnical monitoring challenges due to continuous changes in geometry, loading conditions, instrumentation arrangement, and operational constraints. This paper presents a practical case study of the geotechnical monitoring strategy adopted for a large tailings dam in the process of being raised in stages, focusing on the organizational, operational, and governance aspects, rather than the isolated performance of sensors. The approach integrates automated monitoring systems, conventional instrumentation, maintenance planning routines, data validation protocols, and a centralized Geotechnical Monitoring Center, operating 24/7. The main challenges related to visibility limitations, data reliability during construction phases, instrument downtime, and data interpretation under ever-evolving boundary conditions are discussed. The monitoring framework is anchored in structured governance, defined responsibilities, preventive maintenance routines, and risk-based decision support, ensuring traceability between monitoring data and operational controls. Lessons learned demonstrate that effective monitoring during dam uplift depends less on individual technologies and more on system integration, reliability management, and disciplined operational workflows. The experience provides practical knowledge applicable to similar tailings facilities that are going through construction or elevation phases.

KEYWORDS

Tailings dam; geotechnical monitoring; raising dams; monitoring governance; reliability of instrumentation; case study.

1. INTRODUCTION

Constructed or staged tailings dams are dynamic geotechnical systems, where geometry, loading, hydraulic conditions, and boundary constraints evolve continuously throughout the construction period. During the lifting phases, monitoring systems must maintain their ability to detect deformations, changes in pore water pressure, and other precursors to instability, operating under significant physical, operational, and organizational constraints. These restrictions include limited access, frequent interference from construction activities, temporary loss of instrumentation, and changes in visibility conditions for remote sensing technologies.

The Mirim Tailings Dam is located within the Salobo mining complex in the state of Pará, northern Brazil, as shown in FIGURE 1, and constitutes a critical infrastructure asset for Vale Metias Básicos' copper operation. The facility is responsible for the containment of tailings generated by the Salobo concentration plant and the supply of process water essential to the mine's operations. Due to its strategic role in sustaining production, the Mirim Dam is classified as an active tailings storage facility with extreme consequence classification, requiring monitoring, governance and strict operational controls.

According to the most recent publicly released report on the tailings dam, the Mirim dam currently has a crest elevation of 266.20 m and a height of 86.20 m, with future elevations planned up to a final crest elevation of 285.00 m and a height of 104.32 m. The reservoir currently stores approximately 236 million m³ of water and tailings, with a final storage capacity expected to reach around 353 million m³. The structure consists of a zoned embankment with a crushed quartzite buttress upstream, a central clay core, and a rockfill buttress downstream, complemented by two auxiliary dams built to define the reservoir boundaries during successive upstream uplifts [1].

Due to its size, the dam's importance rating, and its history of continuous uplift, the Mirim dam is supported by an extensive geotechnical and hydrological monitoring system. The facility incorporates many conventional instruments — such as piezometers, displacement markers, and internal drainage monitoring devices — combined with automated surface displacement monitoring systems. The scale and complexity of this instrumentation network impose additional challenges related to data reliability, maintenance, and interpretation, particularly in conditions of active construction and seasonal climate variability.

International guidelines emphasize that for high-impact tailings storage facilities, the effectiveness of monitoring depends not only on the number or type of instruments installed, but fundamentally on governance structures, operational discipline, and the integration of monitoring data into decision-making processes [2,3]. In this context, this article presents a case study of the geotechnical monitoring challenges observed during the gradual ramp-up of the Mirim tailings dam, highlighting the technical, operational, and governance aspects addressed through a centralized Geotechnical Monitoring Center, operating continuously 24/7.



Figure 1: Aerial view of the Salobo Mining Complex showing the Mirim Dam and the auxiliary dams *(Source: Report of the Tailings Storage Facility – Salobo, Vale Metias Básicos, 2026).*

2. CONTEXT OF THE DAM DESIGN AND ELEVATION

The Mirim tailings dam is part of the Salobo mining complex and is designed to store tailings and retain water to meet operational demands. The dam and its associated containment dikes were erected in several stages, with construction activities spread over several years as illustrated in TABLE 1. The lifting strategy includes earthworks, foundation treatment, modifications to drainage systems, and the progressive installation and relocation of instruments.

The process of stepping up the water level imposes specific monitoring challenges, especially when construction progress approaches or exceeds the height of existing instruments, requiring the deactivation, protection, or temporary relocation of sensors. In parallel, reservoir levels and construction sequencing must be managed to maintain adequate safety margins throughout the uplift period. FIGURE 2 shows a comparison between the water level of the reservoir and the elevations of the crest of the dam/saddle dike over time.

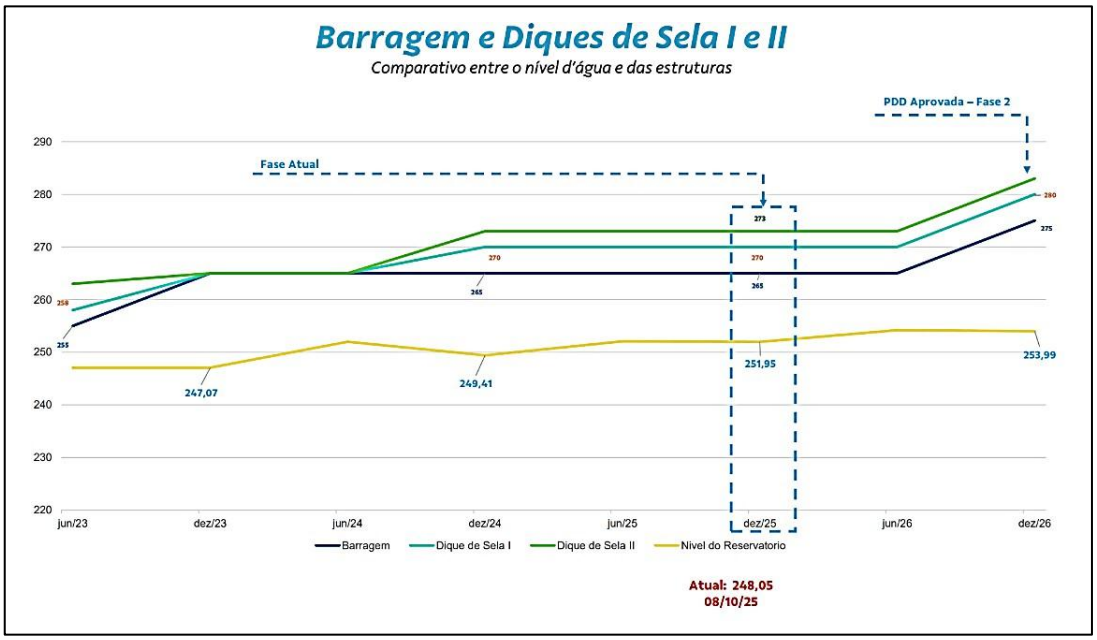


Figure 2: Comparison between reservoir water level and dam crest/saddle dike elevations over time (*Source: Comparative Chart of 13 - Construction Schedule Updates - Mirim.pdf Dam).*

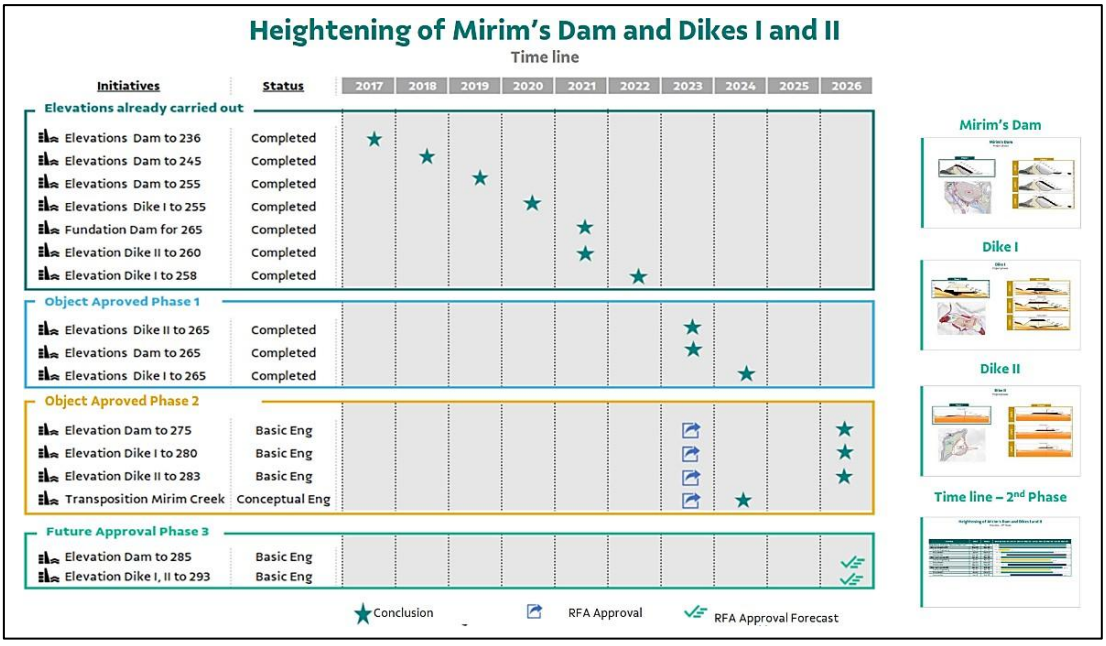


Table 1: Summary of dam and saddle levee phases, elevation targets, and construction periods (*Source: 17 – Construction Schedule Updates – Mirim.pdf Dam).*

3. CHALLENGES OF GEOTECHNICAL MONITORING DURING DAM LIFTING

During the active excavation phase, the geotechnical monitoring system is subjected to a set of complex challenges that are rarely present simultaneously during the steady-state operational phases. These challenges stem from overlapping construction activities, ever-evolving geometry and loading conditions, environmental influences,

and the intrinsic limitations of monitoring technologies. In this context, understanding and managing these challenges becomes essential to maintain the integrity and usefulness of geotechnical monitoring data.

3.1 Geometric Evolution and Variability of Boundary Conditions

The gradual elevation of dams inherently modifies the geometry of the embankment, the drainage elements and the stress regimes of the foundation, as observed in FIGURES 3, 4 and 5. These geometric changes modify the boundary conditions for both the deformation and percolation processes, directly affecting the response recorded by the instrumentation. Instruments originally installed to monitor a given elevation or structural zone can become progressively embedded in the building layers, temporarily covered, or positioned below the active zone of interest.

These transitions complicate the direct comparison of time-series data, since changes in measured response may reflect changes in boundary conditions rather than genuine changes in material behavior. This effect is particularly relevant for displacement measurements obtained from surface-based systems, where reference points and monitored surfaces can be progressively changed during construction activities [4,5].

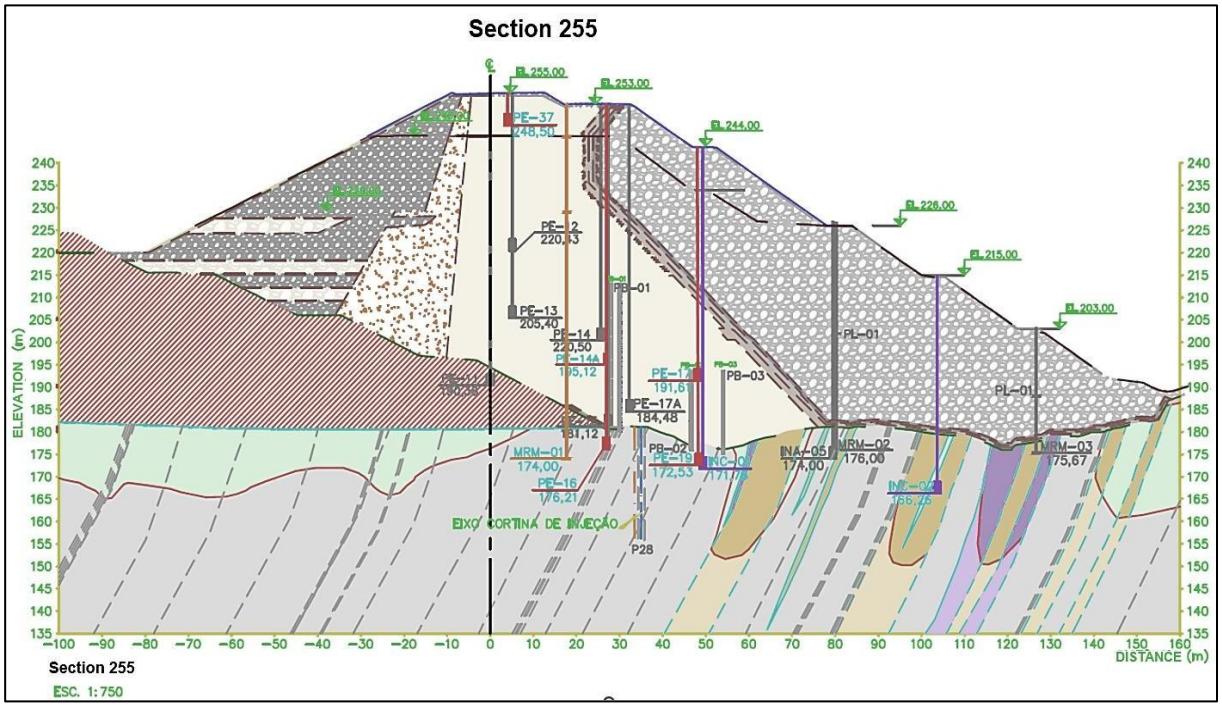


Figure 3: Cross section of the dam showing the elevation stage at 255m

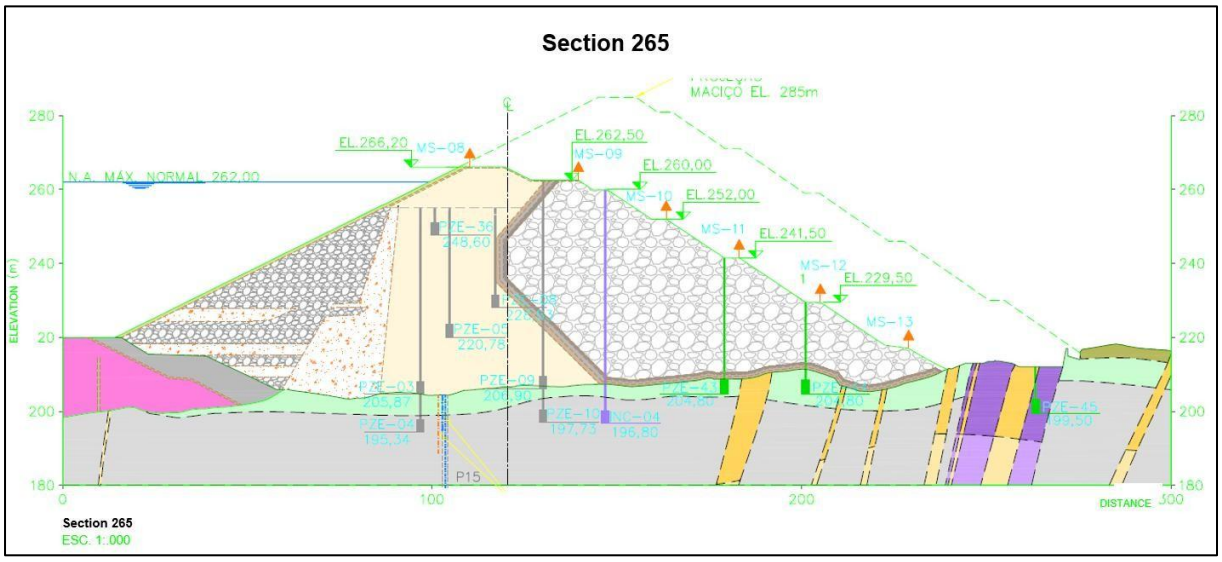


Figure 4: Cross-section of the dam showing the elevation stage at 265m elevation.

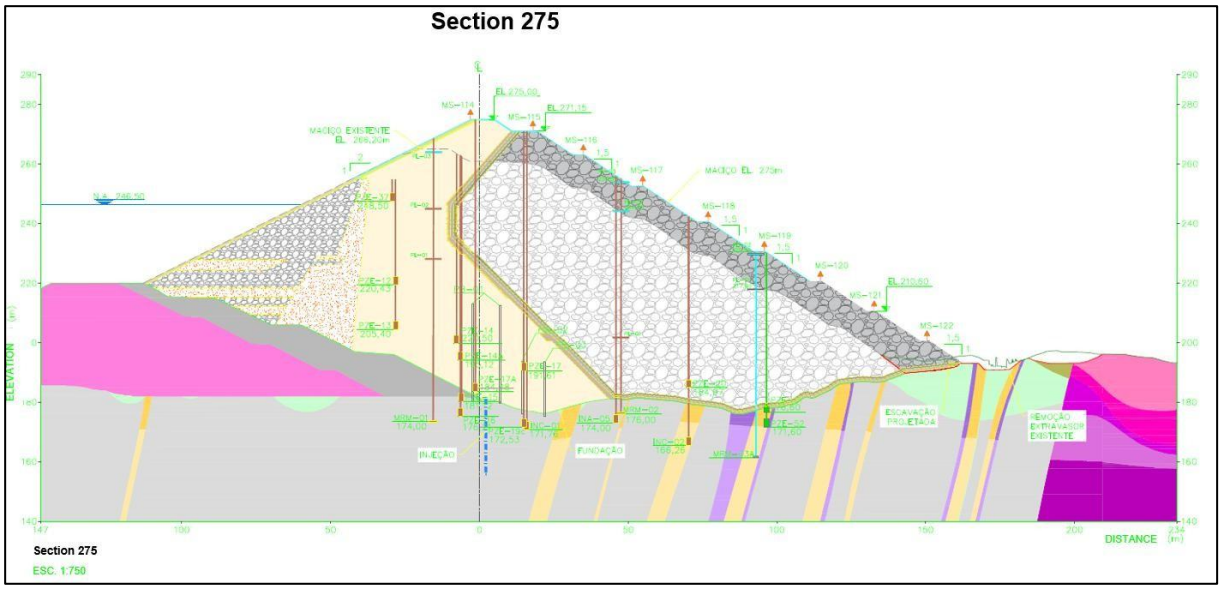


Figure 5: Cross-section of the dam showing the elevation stage at 275 m

3.2 Physical interference and instrument survival during construction

Earthmoving, material transportation, compaction, and drainage installation works have a high probability of physical interference with monitoring equipment. Conventional instruments, such as piezometers, discharge gauges, and inclinometers, are particularly vulnerable to damage, burial, or disconnection during these phases. Automated systems, while reducing the need for field access, are not immune to problems related to power outages, communication failures, and mechanical misalignment.

The survival of the instrument, therefore, becomes a key performance indicator of the monitoring system. Periods of temporary data loss should be predicted and explicitly incorporated into monitoring strategies to avoid misinterpretation of apparent response

gaps such as benign stability conditions or alarms. FIGURE 6 shows examples of exposure, protection and relocation of instrumentation during slope elevations.



Figure 6: Examples of exposure, protection, and relocation of instrumentation during slope elevations.

3.3 Line-of-sight restrictions and limitations of remote sensing

Remote displacement monitoring systems, including robotic total stations, ground-based radars, and InSAR, are widely used due to their ability to provide continuous spatial coverage and high-quality measurements. However, during the process of raising dams, such systems become sensitive to line-of-sight obstructions and operational interferences, such as the presence of construction equipment, newly released landfill material, and temporary structures, which can impact the quality, continuity, and reliability of the data acquired.

The images presented show the progressive evolution of displacements over time (FIGURE 7), analyzed from a spatial grid, allowing the evaluation of the coherence between the points distributed in the massif. The displacement pattern remains compatible with the expected behavior of structures being raised. However, a slight reduction in the percentage of coherence was observed over the periods analyzed.

This decrease is directly related to the progress of the works and the interferences introduced in the massif, including geometric changes, redistribution of stresses and variations in hydraulic conditions. In the context of InSAR-based techniques, factors such as surface roughness, variations in moisture content, and changes in material texture due to recent landfills contribute to decorrelation processes, which can introduce noise or obscure real deformation tendencies.

In addition, the displacements are predominantly in the downstream direction, a typical characteristic of structures in elevation, reflecting the response of the massif to the

incremental loads imposed by the evolution of the work. In this context, the gradual loss of coherence observed in the analysis grid should not be interpreted as data inconsistency, but as a consequence of the increased complexity of the system and the evolution of boundary conditions over time.

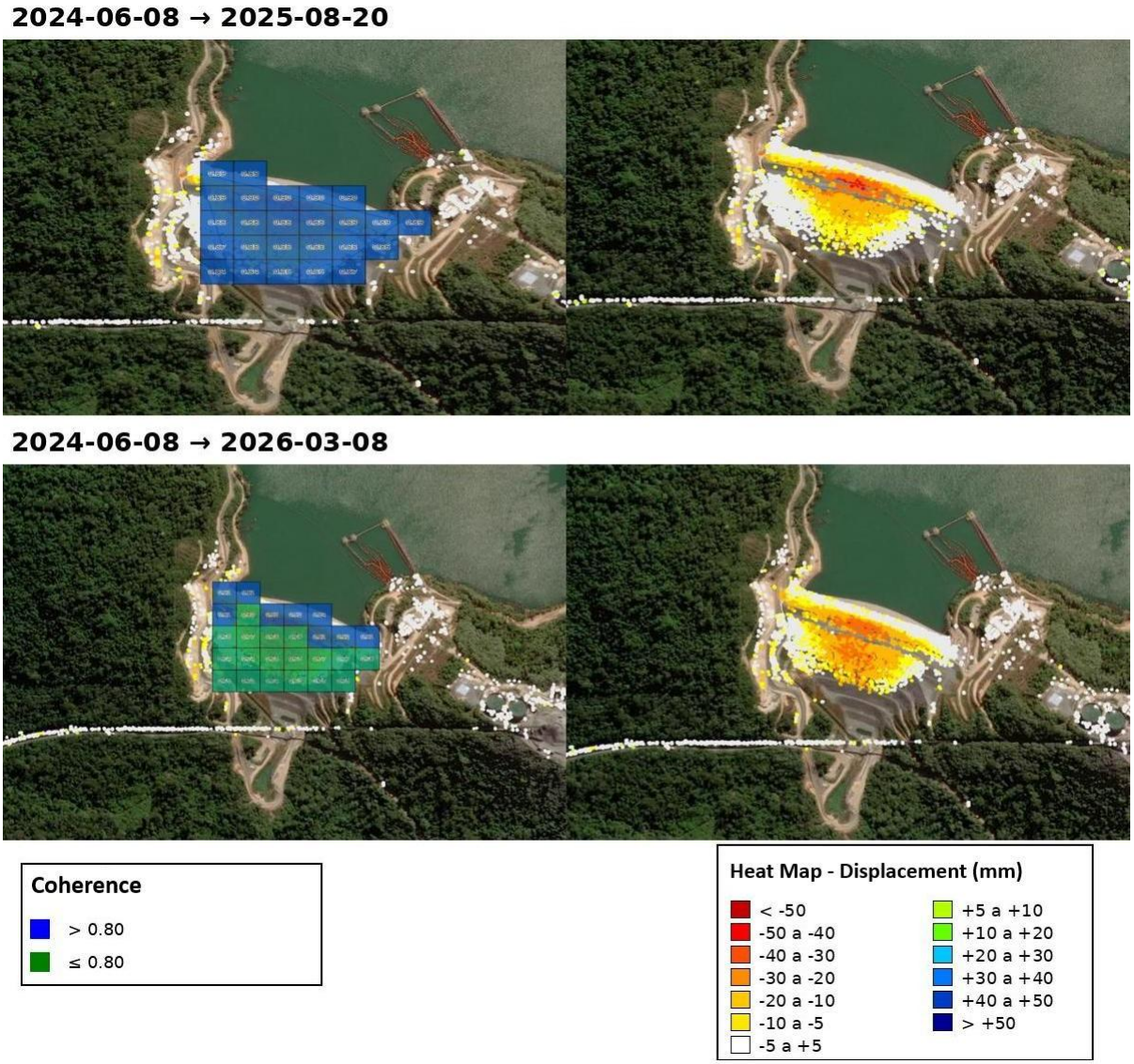


Figure 7: Time series of the loss of InSAR coherence during the raising process of the Dam.

3.4 Climatic influences and environmental noise

Weather conditions, particularly heavy rain events and seasonal variations, play a crucial role in both the geotechnical response of the structure and the quality of monitoring data. Precipitation affects interstitial pressure regimes, surface conditions, and electromagnetic signal propagation, and may obscure the causal relationships between construction activities and measured responses, as shown in FIGURE 8.

Automated displacement systems can record transient movements associated with wetting and drying cycles, thermal effects, or surface softening rather than structural instability. Differentiating these effects from significant geotechnical trends requires

contextual analysis that integrates weather data, construction logs, and instrument health indicators.

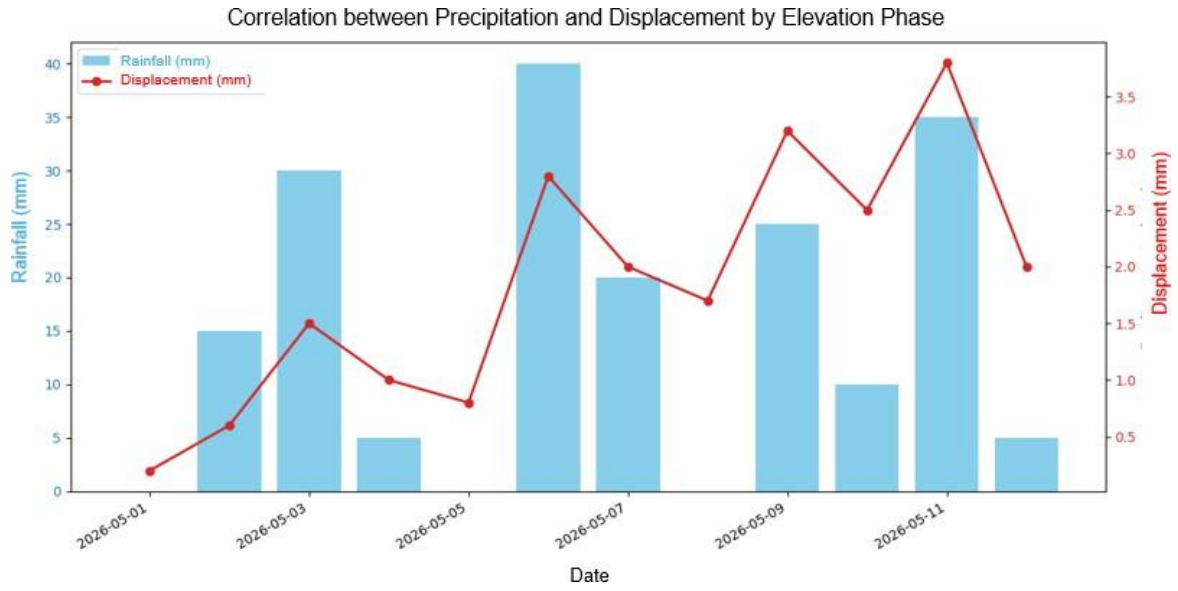


Figure 8: Correlation between precipitation intensity and short-term displacement fluctuations during uplift phases).

3.5 Challenges of Data Continuity, Qualification and Interpretation

Under the combined influence of construction, sensor disruptions and environmental effects, the main challenge shifts from mere data acquisition to data qualification. Monitoring teams must continuously evaluate data continuity, sensor reliability, and signal coherence before drawing conclusions about dam behavior.

This reinforces the need for structured validation routines, redundancy between monitoring technologies, and explicit documentation of the operational context. Without such practices, there is a significant risk of overreacting to artifacts or ignoring precursors of genuine instability [5,7]. The conceptual flowchart for qualification and integration of data during dam construction is presented in FIGURE 9.

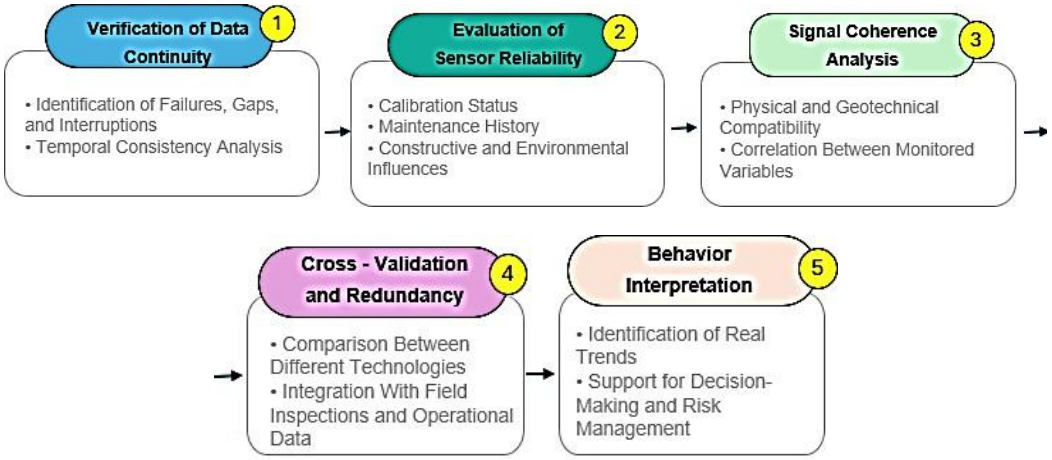


Figure 9: Conceptual flowchart for data qualification and integration during dam construction.

4. MONITORING GOVERNANCE AND OPERATIONAL FRAMEWORK

To address these challenges, monitoring activities have been centralized in a Geotechnical Monitoring Center that operates continuously 24/7. The center integrates data streams of automated and conventional instrumentation, video monitoring systems, and maintenance management platforms, as illustrated in FIGURE 10.

Clear roles and responsibilities were defined, covering data review, alarm validation, escalation protocols, and interfacing with field teams. This governance structure ensures traceability between raw data, validated information, and operational decisions, in line with international best practice recommendations for tailings management systems [2,3].

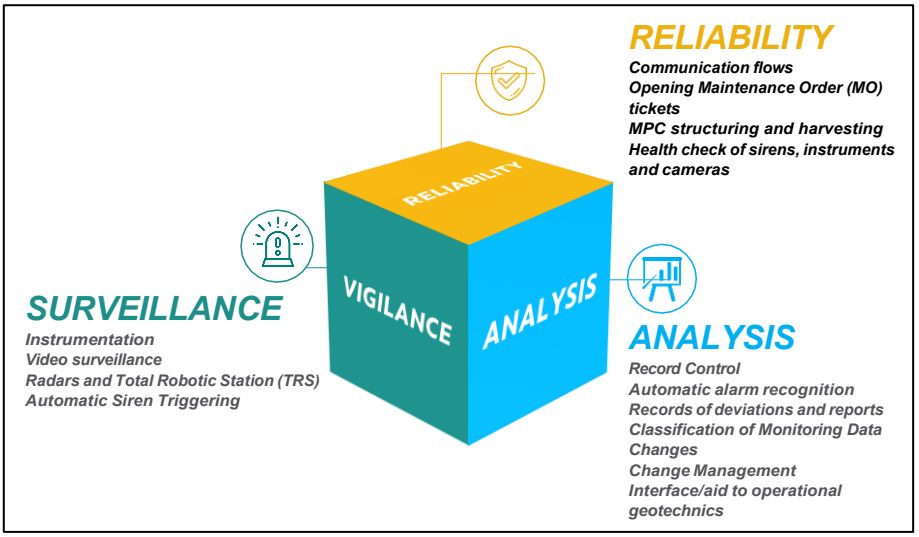


Figure 10: Organizational structure and functional scope of the Geotechnical Monitoring Center

5. INSTRUMENTATION, DATA RELIABILITY, AND MAINTENANCE STRATEGY

The monitoring system combines conventional geotechnical instruments (piezometers, water level indicators, inclinometers, etc.) with automated displacement monitoring technologies. Given the operational context, special emphasis was given to preventive maintenance planning, calibration routines and the systematic recording of instrument status indicators. Figure 11 shows the maintenance planning and control flowchart for automated geotechnical instrumentation, while Table 2 presents the Maintenance Plan, including the inspection and maintenance frequencies established for each type of instrument installed at the Mirim Dam

Maintenance planning and control routines have been integrated into the monitoring workflow, enabling proactive identification of degraded sensors and minimizing unplanned data loss. This approach is in line with recommendations that emphasize reliability management as a core component of monitoring effectiveness [3,7].

MAINTENANCE PLAN		
Instrument	**Quantity**	**Frequency**
Parshall Flume	1	Semiannual
Piezometer	40	Semiannual
Water Level Meter (H_2O)	7	Semiannual
Evaporimeter	1	Semiannual
SSr Radar	1	Monthly
Inclinometer	3	Biweekly
Tiltmeter	12	Monthly
Robotic Station	1	Annual
Settlement Gauge	3	Semiannual
Topographic Marker	41	Semiannual
Flow Meter	1	Semiannual
Rain Gauge	1	Semiannual
Meteorological Station	1	Semiannual

Table 2*: Types of Instruments Recorded at the Mirim Hydroelectric Power Plant (Source: SAFETY REPORTS (RPSB) OF THE SALOBO DAMS AND DIKES, 2024, Section 3.13).*

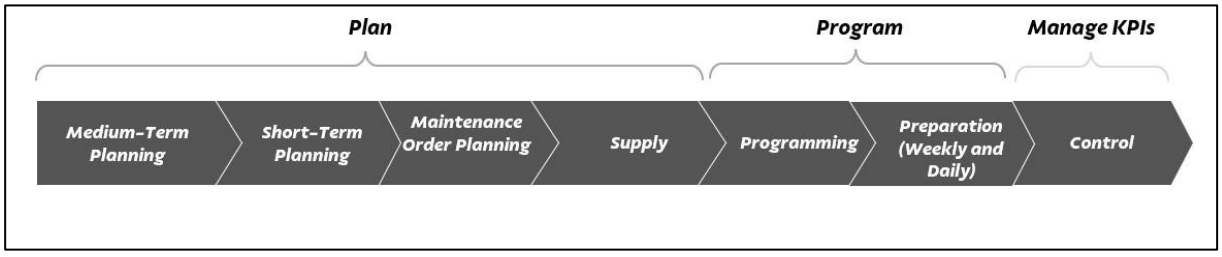


Figure 11: Maintenance planning and control flowchart for automated geotechnical instrumentation *(Source: 2025 10 CMG Norte BM summarized rev3 EN.pptx).*

6. DATA INTEGRATION AND RISK-BASED INTERPRETATION

Monitoring data is interpreted using a risk-based framework, where validated trends are evaluated in conjunction with known construction activities, hydraulic conditions, and geotechnical sensitivities. Instrument performance indicators are evaluated alongside geotechnical measurements to differentiate between genuine behavioral responses and artifacts related to sensor or communication issues.

This integrated approach reflects the current understanding that effective monitoring relies on contextual interpretation and cross-validation of heterogeneous data sources, particularly in non-stationary conditions such as dam augmentation [4–6].

6.1 Data Integration Workflow Summary

Modern geotechnical and structural risk management requires an integrated monitoring system capable of transforming data into safe and agile operational decisions. This process is based on five fundamental pillars:

- Data collection: information from conventional instruments (piezometers,

inclinometers), automated systems (total stations, displacement sensors), remote sensing (InSAR, radar) and complementary sources (meteorology, construction records, status of instruments).

- Centralization: all flows received 24/7, integrated with video and maintenance, stored with traceability.
- Validation and qualification: sensor reliability checks, cross-validation, and noise filtering.
- Risk-based interpretation: analysis of trends considering construction and hydraulics.
- conditions, risk classification, and differentiation between genuine artifacts and signs.
- Operational decision-making: escalation protocols, validated alarms, field staff
- interface and explicit documentation of actions.
- 6.2 Summary of the Practical Example
- The example below shows how the monitoring center avoids false alarms and distinguishes transient effects (rainfall, thermal cycles) from genuine signs of instability.
- Data collection: piezometers record increased pore pressure; Automated
- Sensors detect surface movements; ground-based radar shows variations in the slope of the terrain; Weather data confirm heavy rains.
- Centralization: data streams received in real time, identified correlation between precipitation and instrument responses, videos show water accumulation.
- Cross-validation: the comparison between piezometers and radar confirms that part of the variations are effects of precipitation; Displacement data has been filtered to remove noise.
- Risk-based interpretation: moderate risk due to temporary increase in pore pressure; decision to intensify inspections and monitoring for 48 hours.
- Operational decision-making: field teams mobilized to check drainage; reports document context, validated data, and measures; Traceability ensures the link between raw data and decisions.

7. CHALLENGES, LIMITATIONS, AND MITIGATION STRATEGIES IN MONITORING DURING DAM RAISING OPERATIONS

During the successive stages of dam raising, challenges were encountered related to the evolving geometry of the structure, the survival and relocation of monitoring instruments, limitations of remote sensing systems, climatic influences, and the maintenance of data continuity and reliability. Continuous changes in boundary conditions and construction activities affected the performance of monitoring systems, requiring ongoing adaptations in data acquisition and interpretation strategies. To mitigate these effects, measures such as sensor relocation and protection, preventive maintenance, integration of multiple monitoring technologies, cross-validation of information, and the incorporation of meteorological and operational data into the analysis process were implemented. The lessons learned highlight the importance of technological redundancy, structured governance, and the continuous adaptation of monitoring systems throughout the dam's evolution,

contributing to more reliable and effective risk management.

8. LESSONS LEARNED AND CONCLUSIONS

The experience gained during the phased uplift of the Mirim tailings dam clearly demonstrates that geotechnical monitoring in active construction contexts is fundamentally an organizational, operational and governance challenge, and not purely technological. While advanced monitoring systems provide data with ever-increasing resolution and in near real-time, their effectiveness depends directly on how that data is qualified, contextualized, and integrated into operational decision-making processes.

One of the key lessons learned is that monitoring during dam construction cannot be treated as a static or linear process. Continuous changes in geometry, loading conditions, and environmental exposure require adaptive monitoring strategies that can evolve in parallel with the structure itself. This includes anticipating periods of data loss, sensor relocation, or reduced data quality, and explicitly incorporating these limitations into interpretation workflows. Failure to recognize these transition phases can lead to an excess of false alarms or, conversely, to an unwarranted perception of stability.

The case study further highlights the crucial role of data reliability management. Preventive maintenance planning, instrument health monitoring, and redundancy between monitoring technologies proved essential to maintaining monitoring continuity in challenging field conditions. Systematic differentiation between genuine geotechnical responses and artifacts associated with construction activities, weather influences, or sensor malfunctions was only possible through rigorous data qualification routines and multi-source cross-validation.

Centralized monitoring through a Geotechnical Monitoring Center operating continuously 24/7 has emerged as an essential factor for effective risk management. The integration of the monitoring data with the predefined construction records, weather information, and escalation protocols allowed for the timely identification of abnormal trends and ensured traceability between observed behavior and operational responses. This governance structure has reduced reliance on individual interpretations and increased consistency, transparency, and accountability in decision-making.

From a broader perspective, the case of the Mirim dam confirms that, for tailings storage facilities classified as having extreme consequences, the effectiveness of monitoring is inseparable from governance. Clearly defined functions, decision boundaries and communication channels are just as crucial as the accuracy of the sensors. The lessons learned reinforce international guidelines that emphasize monitoring as an integral component of the tailings management system, linking surveillance, maintenance and emergency preparedness.

In conclusion, this case study demonstrates that the main determinants of the effectiveness of geotechnical monitoring during dam construction are systems integration, data reliability management, and structured governance. The structure adopted allowed continuous knowledge of the situation throughout the successive phases of construction, despite significant operational and environmental constraints. These lessons are directly applicable to other tailings facilities in the process of

construction or staged modification and provide practical information to improve the robustness of monitoring, quality of decision-making, and risk control in high-impact tailings dams.

REFERENCES

[1] Vale Base Metals (2026). *Tailings Storage Facility Report – Salobo*. February 2026. Available at: https://valebasemetals\.com/wp\-content/uploads/2026/04/en\-Fev_2026_TSF\-Report\-Salobo_Rev2\.pdf

[2] World Bank (2021). *Good Practice Note on Dam Safety – Technical Note 7: Tailings Storage Facilities*. World Bank, Washington, DC.

[3] ICMM (2021). *Tailings Management: Good Practice Guide*. International Council on Mining and Metals.

[4] Rana, N.M. et al. (2024). Application of Sentinel-1 InSAR to monitor tailings dams and predict geotechnical instability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83.

[5] Jiang, Y. et al. (2026). Reliable automated displacement monitoring using robotic total stations. *Sensors*, 26.

[6] Hamze-Guilart, M. et al. (2025). Analyzing the effect of drainage on the stability of tailings dams using cross-correlations. *Sensors*, 25(6).

[7] Cacciuttolo, C. et al. (2024). Sensor technologies for safety monitoring in mine tailings storage facilities. *Minerals*, 14(5).

[8] RL-9002SA-X-70333 – Barragens de Rejeitos de Mirim - Períodico de Segurança (RPSB) das Barragens e diques de Salobo . Geocoba (2024).



BARBOSA, Felipe Campolina

Mining Engineer, graduated in Geotechnics, with an MBA in Business Administration and master's degree at UFOP (Geomechanics and Seismology). He has experience in Soil/Rock Mechanics and Hydrogeology, having worked in more than 23 mines and projects throughout Brazil. He is currently corporate manager of geotechnical services at Vale Metais Bases.



COSTA, João Paulo Rodrigues

PhD in Geotechnics (UFOP, 2025), MSc in Geotechnics (UFOP, 2019), Mining Engineer (UFMG, 2010) and Civil Production Engineer (CEFET-MG, 2015). Technical Manager of Tailings Management at VALE Base Metals, with 16+ years of experience in geotechnics, mining and hydroelectric dams, operation and monitoring.



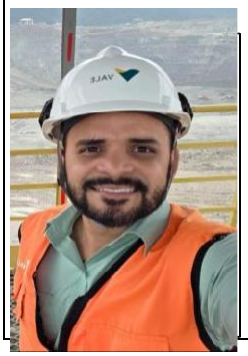
SOUSA, Simone da Conceição

Geological Engineer graduated from UFOP/MG with an MBA in Project Management and specialization in Geotechnical Engineering. Solid experience in Geotechnics of Dams and Geotechnical Monitoring. Currently, Master Engineer at the Northern Geotechnical Monitoring Center, at Vale Metais Base, where he develops activities focused on monitoring, analysis and management of geotechnical data, in addition to leading teams.



LEANDRO, Vanessa Cristina Pereira.

Graduated in Production Engineering from the University of Triângulo (UNITRI) and has a postgraduate degree from the Pontifical Catholic University of Minas Gerais (PUC Minas). Currently, she works as a Senior Engineer at the North Geotechnical Monitoring Center, developing activities external to the monitoring, analysis and management of geotechnical data.



SILVA, Thiago Bleno

Control and Automation Engineer with experience in geotechnical instrumentation, automation and technologies applied to the monitoring of dams and slopes in open pit mines. Skills in geotechnical monitoring systems, data integration and automation, specialized software, implementation of new technologies and operational safety.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

APLICAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE E DE REFERÊNCIA DA INSTRUMENTAÇÃO COMO SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO NA SEGURANÇA DE BARRAGENS

Daniela Rodrigues RIBEIRO
Engenheira Civil - CTG Brasil

Soraia Bastos KATERENIUK
Engenheira Civil - Intertechne Consultores

Rodrigo Miranda CARVALHO
Engenheiro Civil - CTG Brasil

Pedro Nunes PEREIRA
Engenheiro Civil - CTG Brasil

RESUMO

A instrumentação de auscultação é um recurso essencial para o monitoramento de barragens, permitindo acompanhar o comportamento da estrutura e identificar variações associadas aos principais modos de falha. Suas leituras periódicas, quando tecnicamente interpretadas, subsidiam a tomada de decisão e a definição de ações preventivas ou corretivas. Nesse contexto, os níveis de controle ou de referência da instrumentação atuam como ferramenta preditiva e de triagem técnica, permitindo rápida identificação de desvios em relação ao comportamento esperado da estrutura. Esses níveis são, em geral, definidos ou revisados durante as Revisões Periódicas de Segurança (RPS), considerando as condições de projeto, operação e comportamento histórico das leituras. A ultrapassagem desses níveis não caracteriza, por si só, um problema, mas atua como um sinal técnico de alerta que indica a necessidade de aprofundar a investigação. Esse processo subsidia a tomada de decisão, permitindo direcionar ações de monitoramento ou intervenção. Nesse contexto, o presente artigo discute a aplicação dos níveis de controle e de referência da instrumentação na gestão da segurança de barragens, apresentando casos reais em que alterações nos padrões de leitura subsidiaram investigações técnicas e a adoção de medidas corretivas. Destacam-se o caso da UHE Capivara (SP), onde foram executadas perfurações de drenos na galeria da casa de força visando reduzir a subpressão, e o caso da UHE Salto (GO), no qual foram realizadas obras de recuperação do sistema de drenagem no pé da barragem visando o controle adequado das vazões e à eliminação do carreamento de sedimentos nos medidores de vazão.

ABSTRACT

Monitoring instrumentation is an essential resource for dam surveillance, as it enables the assessment of structural behavior and the identification of variations associated with the main failure modes. When technically interpreted, periodic readings support decision-making and the definition of preventive or corrective actions. In this context, instrumentation control and reference levels act as a predictive and technical screening tool, allowing the rapid identification of deviations from the expected structural behavior.

These levels are generally defined or reviewed during Periodic Safety Reviews (PSRs), considering design conditions, operational aspects, and the historical behavior of the readings. The exceedance of these levels does not, by itself, characterize a problem, but rather acts as a technical warning sign indicating the need for further investigation. This process supports decision-making by guiding monitoring or intervention actions.

Within this context, this paper discusses the application of instrumentation control and reference levels in dam safety management, presenting real cases in which changes in reading patterns supported technical investigations and the adoption of corrective measures. Notable examples include the Capivara Hydroelectric Power Plant, in São Paulo State, where drainage holes were drilled in the powerhouse gallery to reduce uplift pressure, and the Salto Hydroelectric Power Plant, in Goiás State, where rehabilitation works were carried out on the drainage system at the downstream toe of the dam in order to ensure proper seepage flow control and eliminate sediment transport in the flow measuring devices.

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens depende não apenas de projeto e construção adequados, mas também de um processo contínuo de acompanhamento do comportamento da estrutura ao longo de sua vida útil. Nesse contexto, a instrumentação de auscultação constitui uma ferramenta essencial para o monitoramento de grandezas relevantes à segurança, permitindo avaliar a resposta da barragem frente aos carregamentos atuantes e identificar, em tempo oportuno, alterações que possam indicar o desenvolvimento de anomalias.

Além de viabilizar o acompanhamento de parâmetros como vazões, poropressões, subpressões, níveis d'água e deslocamentos, a instrumentação adquire maior utilidade quando suas leituras são analisadas de forma sistemática. As análises devem ser realizadas à luz do comportamento esperado da estrutura e em correlação com informações de inspeção, operação e histórico da barragem.

Nesse processo, os níveis de controle e de referência cumprem papel central, atuando como critérios técnicos para avaliação das leituras dos instrumentos e como parâmetros de comparação para a identificação de desvios de comportamento. Dessa forma, contribuem para a triagem técnica das ocorrências e para o direcionamento de investigações complementares.

A superação desses níveis, por si só, não caracteriza necessariamente uma condição crítica, mas representa um indicativo de que a situação deve ser analisada com maior profundidade e de forma integrada.

Esse entendimento é relevante no contexto da gestão da segurança de barragens, em que a interpretação qualificada dos dados de instrumentação pode subsidiar desde o aprofundamento de diagnósticos até a definição de medidas corretivas, preventivas ou de melhoria operacional. Assim, mais do que registrar medições, a instrumentação passa a atuar como ferramenta de apoio à tomada de decisão, especialmente quando associada a critérios de análise consistentes e periodicamente reavaliados.

Com base nessa premissa, o presente artigo discute a aplicação dos níveis de controle e referência da instrumentação como ferramenta de apoio à gestão da segurança de barragens. A abordagem enfatiza a interpretação de desvios de comportamento, o direcionamento de investigações complementares e a tomada de decisão, a partir de estudos de caso reais em usinas hidrelétricas.

2. INSPEÇÃO VISUAL E INSTRUMENTAÇÃO NO DIAGNÓSTICO DE ANOMALIAS

A inspeção visual e a análise dos dados de instrumentação constituem os dois pilares de qualquer diagnóstico sobre a integridade de uma estrutura, devendo ser tratadas como recursos complementares. A Figura 1 ilustra os processos de monitoramento de inspeção e de instrumentação.

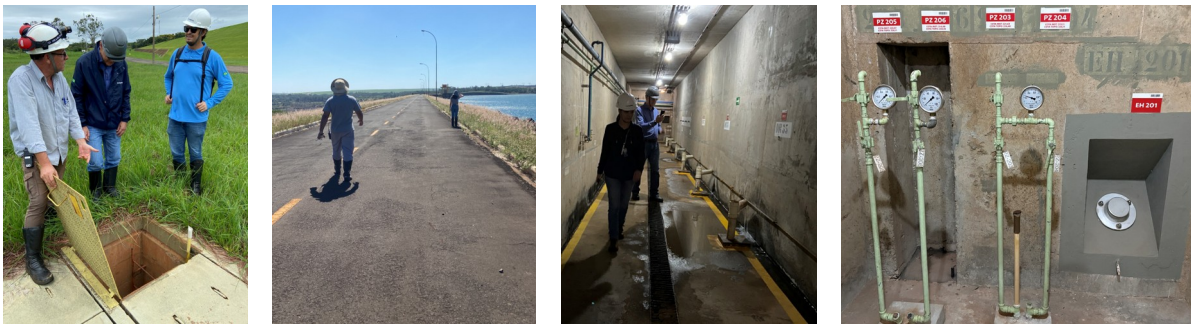


Figura 1: Registros de monitoramento de inspeção e instrumentação.

Segundo a ANA [1], as atividades de monitoramento da instrumentação são complementadas pelas inspeções de segurança, com vista à detecção de deterioração, comportamentos anômalos ou sintomas de envelhecimento das estruturas, além da detecção de anomalias na própria instrumentação instalada na barragem.

A inspeção de segurança deve ser realizada, sempre que possível, a pé. Quando não houver acesso seguro disponível, deve-se recorrer ao uso de embarcações ou mesmo de tecnologias, como drones, conforme ilustra a Figura 2.



Figura 2: Inspeção com drone em andamento.

Quando realizada adequadamente, a inspeção visual pode identificar situações anômalas em uma estrutura, tais como trincas, sinais de deslocamentos diferenciais, afundamentos, perda de rochas de proteção, crescimento de vegetação de grande porte, erosões, presença de animais, infiltrações, surgências, carreamento de materiais, odores anômalos, entre outros.

No caso de uma barragem bem instrumentada, é possível que existam instrumentos instalados nesses locais que indiquem sinais visuais de anomalia, fornecendo, assim, informações complementares para o estabelecimento de um diagnóstico adequado. Como exemplo, pode-se citar o início da colmatação do sistema de drenagem de uma barragem de terra, evidenciado tanto pelo aumento da pressão registrada pelos piezômetros quanto pelo aparecimento de água no talude de jusante (surgência).

Há também casos em que a instrumentação revela riscos ocultos, não perceptíveis por meio de inspeção visual. Como exemplo, podem ser citadas subpressões elevadas em fundações de estruturas de concreto, evidenciadas por piezômetros, sem que haja manifestações visíveis de anomalia.

Outro exemplo é a ocorrência de deslocamentos graduais, da ordem de milímetros ou centímetros, que podem se desenvolver em uma estrutura sem o aparecimento simultâneo de trincas ou afundamentos. Nesses casos, instrumentos como extensômetros de haste, medidores triortogonais ou marcos superficiais podem identificar a anomalia.

A análise conjunta da inspeção visual e da instrumentação deve ser sempre realizada. No entanto, na presença de anomalias sem evidências visíveis, a instrumentação, associada aos níveis de controle, passa a constituir a principal ferramenta de diagnóstico. Ainda assim, ressalta-se que, sempre que possível, os resultados da instrumentação não devem ser utilizados como único subsídio para a tomada de decisão.

Uma vez reconhecida a complementaridade entre a instrumentação e a inspeção visual no diagnóstico de anomalias, torna-se necessário estabelecer critérios objetivos para a interpretação das leituras obtidas. Nesse contexto, inserem-se os níveis de controle e de referência da instrumentação.

3. FUNDAMENTOS DOS NÍVEIS DE CONTROLE E REFERÊNCIA EM INSTRUMENTAÇÃO

Conforme apresentado anteriormente, a instrumentação de barragens tem como finalidade acompanhar o comportamento da estrutura ao longo do tempo, permitindo a interpretação da sua resposta frente às condições de carregamento.

A utilidade desse monitoramento está associada à capacidade de transformar medições em informações interpretáveis, o que exige a definição prévia de parâmetros de comparação. Nesse contexto, os níveis de referência e os níveis de controle constituem a base para avaliação do desempenho da barragem e para a identificação de eventuais desvios de comportamento.

A definição de níveis de referência e níveis de controle deve estar associada a hipóteses de comportamento previamente formuladas, conforme proposto por John Dunnicliff, que destaca que a instrumentação deve ser planejada com o objetivo de responder a questões específicas relacionadas ao desempenho da obra. Nesse sentido, o autor afirma que hipóteses de comportamento devem ser estabelecidas antes da definição do programa de instrumentação, e que cada instrumento deve ser selecionado de forma a contribuir para a verificação dessas hipóteses [2]. Dessa forma, os níveis de referência/controle não são valores arbitrários, mas sim parâmetros coerentes com o modelo geotécnico e estrutural adotado para a barragem.

Partindo desta premissa, os autores defendem a definição dos níveis de controle da instrumentação a partir de uma abordagem integrada, que combina análises determinísticas, estatísticas e comparativas, escolhidas conforme as características do instrumento, da estrutura monitorada e da fase de vida do empreendimento.

Na etapa inicial, especialmente durante a construção e o primeiro enchimento do reservatório, predominam os valores de controle determinísticos, calculados a partir de modelos matemáticos e critérios de projeto. Nessa abordagem, são estabelecidos níveis de atenção e alerta associados, respectivamente, a condições de carregamento normal e excepcional, funcionando como limites para avaliar se o comportamento do maciço e das estruturas está compatível com os fatores de segurança adotados no projeto [3]. A Figura 3 ilustra os limites de controle de atenção e alerta, bem como a condição do instrumento monitorado (Normal, Atenção ou Alerta) a partir da comparação entre as leituras obtidas e esses limites.



Figura 3: Faixas de classificação das leituras em função dos níveis de controle estabelecidos.

À medida que a barragem entra em operação e se constrói uma base consistente de dados, a definição dos níveis passa a incorporar valores de referência estatísticos, definidos com base na série histórica de medições do próprio instrumento. Essa metodologia permite identificar faixas esperadas de variação e reconhecer desvios de comportamento que possam indicar anomalias. A Figura 4 ilustra um exemplo da metodologia estatística aplicada a um piezômetro, cujo limite superior foi definido tal que 99% das leituras se enquadram no intervalo definido.

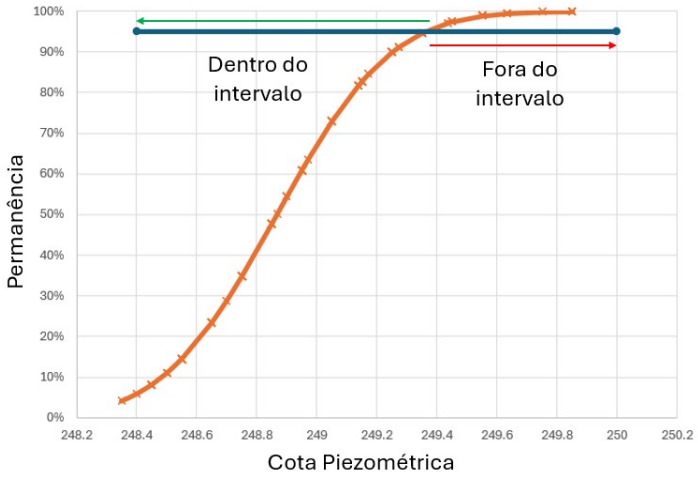


Figura 4: Exemplo de gráfico do intervalo dos valores aceitos.

Quando não é possível aplicar nem o método determinístico nem o estatístico, seja por limitações de modelagem, grande variabilidade das medições ou ausência de histórico representativo, são utilizados valores de referência obtidos a partir de observações em outras barragens semelhantes em operação, devidamente auscultadas e com desempenho comprovadamente satisfatório [3].

A utilização de níveis de controle contribui para a sistematização das análises de desempenho das estruturas, reduzindo a subjetividade na interpretação dos dados e estabelecendo critérios para a tomada de decisão. Ao associar valores medidos a faixas de comportamento, torna-se possível identificar tendências, comparar condições operacionais e avaliar a resposta da estrutura ao longo do tempo. Esse processo está alinhado com a abordagem observacional, na qual o comportamento real da obra é continuamente comparado com as previsões iniciais, permitindo ajustes na interpretação e, quando necessário, nos próprios critérios adotados [2].

Desta forma, cabe destacar que os níveis de referência e de controle não devem ser tratados como parâmetros fixos ao longo de toda a vida útil da barragem. À medida que novos dados são obtidos e o comportamento da estrutura se torna mais bem compreendido, esses níveis podem ser reavaliados e ajustados, de forma a refletir com maior precisão a condição real da barragem.

A definição dos valores de controle e de referência ocorre, principalmente, na fase de projeto, quando a instrumentação é definida e se fixam os valores esperados para as estruturas projetadas.

A redefinição desses valores, por sua vez, ocorre usualmente nos estudos de Revisão Periódica de Segurança (RPS), visto que durante esses estudos toda a documentação de projeto da barragem e o histórico da operação das estruturas e da instrumentação são reavaliados.

A Resolução ANEEL 1.064/2023, alterada pela 1.129/2025, em seu Art. 16º, inciso VII, apresenta que a RPS deve compreender, dentre outros itens, a revisão dos limites de atenção e alerta para os instrumentos de auscultação da barragem, considerando os critérios de projeto [...].

A utilidade prática desses níveis, contudo, depende de um processo confiável de aquisição, registro, organização e análise das leituras, de modo que os dados gerados possam ser efetivamente convertidos em informação para a engenharia.

4. GESTÃO DA INFORMAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

1.1. Visão geral do processo de gestão

O processo de gestão da informação da instrumentação pode variar conforme o empreendedor da barragem. Essa gestão envolve desde a coleta e registro das leituras, armazenamento, plotagem em gráficos ou formatos que facilitem a sua interpretação e análise das leituras (já transformadas em parâmetros de engenharia).

É importante que a gestão em todas essas etapas seja adequada para que traga informações úteis para o diagnóstico da estrutura, principalmente, e para eventuais tomadas de decisão.

A Figura 5 apresenta fluxograma sugerido para o processo de obtenção de leitura de instrumentos até a emissão de relatórios de acompanhamento ou até a implantação de uma obra preventiva ou corretiva.



Figura 5: Mapeamento do processo de leitura de instrumentos.

Fonte: Próprios Autores (2026)

Para fins orientativos, descrevem-se, a seguir, explicações dessas etapas apresentadas no fluxograma.

1.2. Aquisição e registro das leituras

A aquisição e registro das leituras (coleta) pode ser realizada por equipe própria do empreendedor ou por equipe terceirizada, desde que devidamente treinadas para este fim. A Figuras 6 ilustra a obtenção de leituras de um piezômetro por meio de um equipamento de leitura denominado pio e a Figura 7 apresenta a realização de leitura topográfica por meio de régua e nível topográfico, respectivamente.



Figura 6: Leitura de piezômetro sendo realizada



Figura 7: Régua e nível topográfico

Quanto à frequência dessa coleta, a NBR 17189 [4] estabelece conforme a fase da barragem. Em operação normal, a periodicidade deve permitir a identificação de anomalias em tempo hábil para adoção de medidas de controle voltadas à segurança da estrutura.

De forma geral, considerando a estrutura em operação há algum tempo, adotam-se leituras semanais para medidores de vazão, quinzenais para piezômetros e medidores de nível d'água, mensais para instrumentos de deslocamento, como extensômetros de haste, medidores de recalque, medidores triortogonais e pêndulos e semestral para marcos topográficos.

Há, ainda, uma tendência que tem permeado a gestão da instrumentação que é a automatização de instrumentos para a obtenção de leituras instantâneas, a qualquer momento solicitado. Essa evolução tecnológica tem proporcionado um grande ganho para o processo de monitoramento da instrumentação.

Sobre o registro dessas leituras, esse pode ser feito por meio de cadernos de anotação (método mais obsoleto) ou por aplicativos digitais. O uso de cadernos ou pranchetas deve ser realizado com cautela, uma vez que está sujeito a erros de caligrafia e a falhas na transcrição dessas informações para o meio digital. Por outro lado, o registro por aplicativos também está sujeito a erros de digitação.

No caso do uso de aplicativos, os dados são armazenados em sistemas de gestão de segurança de barragens, que auxiliam no seu gerenciamento. Esses sistemas permitem o registro das leituras diretamente em campo, por meio de aplicativos de celular, denominados coletores. Nessa abordagem, juntamente com o registro das leituras, é possível a visualização imediata de parâmetros como os valores máximos e mínimos históricos, bem como a média das 12 últimas leituras, o que contribui para a redução de erros de digitação ou de coleta de leituras.

A cada nova coleta de leituras da instrumentação, a avaliação técnica consiste na comparação dos resultados obtidos com o comportamento histórico dos instrumentos e com seus respectivos níveis de controle, de modo a identificar eventuais comportamentos anômalos.

Caso seja identificada uma leitura inconsistente — possivelmente decorrente de falhas na obtenção ou no registro dos dados — a medição deverá ser refeita, verificando-se a ocorrência de possíveis erros de leitura ou de registro.

1.3. Plotagem em gráficos

Confirmada a confiabilidade da leitura, os dados devem ser plotados de maneira que viabilizem a adequada interpretação. Este formato pode ser uma tabela ou gráfico, correlacionando as medidas com os valores esperados ou considerados normais, com parâmetros que possam influenciá-las, como nível d'água de montante, de jusante e temperatura ambiente [4].

Recomenda-se que, se possível, junto a esses gráficos, sejam apresentados os níveis de controle ou de referência dos instrumentos, a fim de se ter mais um parâmetro para a análise.

A Figura 8 a seguir apresenta um exemplo de um piezômetro instalado no tapete drenante de uma barragem que tem suas leituras condicionadas pelas variações do nível de jusante do rio. Nesse caso, é interessante que a interpretação do instrumento não seja desvinculada dos níveis de jusante do rio.

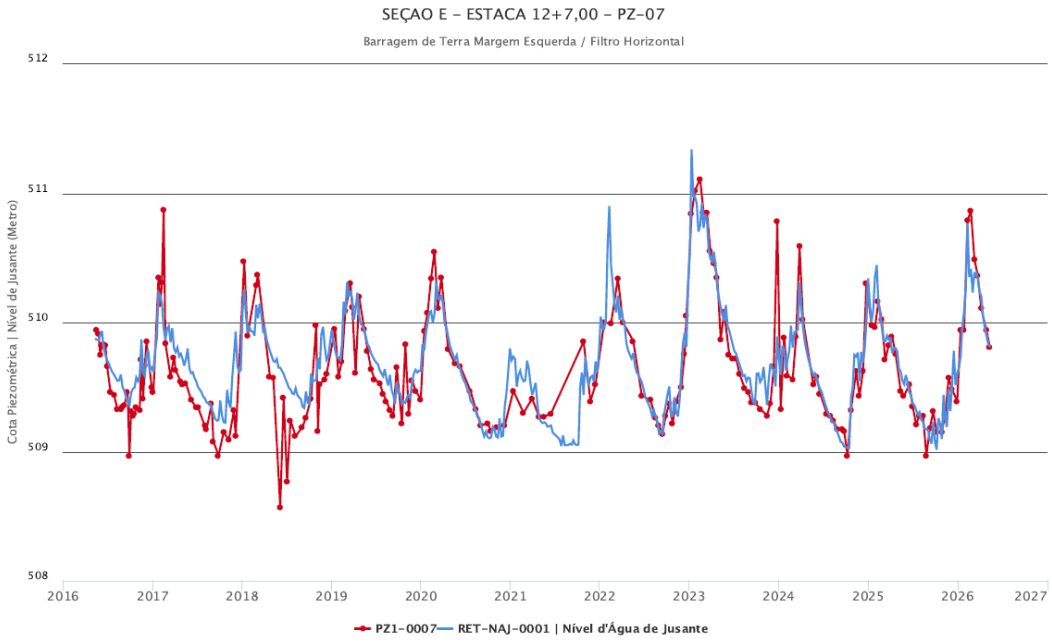


Figura 8 – Exemplo de gráfico de piezômetro com leituras do nível de água a jusante para facilitar a semelhança na variação das leituras.

Fonte: Sysdam (2026).

1.4. Análise das grandezas monitoradas e tomadas de ação

Nessa etapa, são analisadas as grandezas monitoradas pela instrumentação, como poropressão, vazão e deslocamento. A análise deve basear-se na comparação entre os valores observados e os valores esperados para essas grandezas, sejam eles previstos em projeto ou historicamente registrados pelo instrumento.

Nesse contexto, a análise deve considerar os níveis de controle e de referência estabelecidos para os instrumentos, uma vez que esses parâmetros auxiliam na avaliação da coerência e da segurança das leituras obtidas.

Nessa rotina de gestão, quando as leituras se mantêm compatíveis com o histórico, o comportamento é considerado adequado e são emitidos os relatórios de monitoramento — usualmente com frequência mensal —, bem como os pareceres relacionados à segurança da barragem.

Por outro lado, caso as leituras obtidas apresentem desvios em relação ao comportamento histórico e não seja constatado erro de medição, deve-se investigar a origem dessas alterações. Para isso, deverão ser realizadas análises complementares pela equipe de engenharia, incluindo a verificação dos equipamentos de leitura, inspeções em campo, leitura de instrumentos localizados na mesma seção e/ou em seções próximas, além da análise do histórico operacional da barragem e de eventuais intervenções de manutenção na região.

Se, ainda assim, não for possível obter um diagnóstico conclusivo, novas ações deverão ser adotadas para possibilitar a adequada compreensão da situação, podendo incluir apoio de consultoria externa, estudos complementares, levantamentos de campo e análises laboratoriais. A partir dos resultados obtidos, poderá ser identificada a necessidade de implantação de medidas preventivas, corretivas ou de obras de reparo.

2. IDENTIFICAÇÃO E TRATAMENTO DE ANOMALIAS

No cotidiano da operação da barragem, quando os resultados da instrumentação se mostram coerentes com o histórico da estrutura, sem alterações abruptas de comportamento, tem-se a condição mais desejável de monitoramento.

No entanto, a instrumentação também pode indicar a ocorrência de anomalias na barragem, subsidiando a tomada de decisão quanto à implementação de medidas preventivas ou corretivas.

O Quadro 1 a seguir apresenta exemplos de possíveis anomalias identificadas por meio da instrumentação, bem como sugestões de intervenções de reparo. Ressalta-se, contudo, que as soluções apresentadas possuem caráter meramente indicativo, não devendo ser interpretadas como aplicáveis a todos os casos. Cada situação deve ser analisada de forma individualizada, sendo necessária a elaboração de projeto de engenharia específico por profissionais devidamente capacitados.

Quadro 1 – Identificação de anomalias e obras para adequação

	Comportamentos anômalos indicados pela instrumentação	Instrumento com leituras anômalas	Estrutura	Possibilidade de reparo
I	**Elevação da pressão na fundação**	- Piezômetros;	Barragem de Terra	- Construção de sistema de drenagem no pé da barragem (filtro invertido); - Perfuração de poços de alívio; - Construção de tapete impermeável a montante.
II	**Colmatação do sistema de drenagem**	- Piezômetros; - Medidores de nível d'água; - Medidores de Vazão.	Barragem de Terra	- Construção de berma de equilíbrio; - Lançamento de materiais de transição e enrocamento no pé; - Impermeabilização do talude de montante.
III	**Aumento de percolação no contato barragem de terra-concreto**	- Células de tensão total associadas a piezômetros; - Medidor de nível d'água.	Contato da Barragem de terra com Concreto (abraço)	- Execução de tratamento de vedação no contato terra-concreto; - Implantação de sistema de drenagem complementar.
IV	**Recalques diferenciais excessivos**	- Marcos Superficiais; - Medidores de Recalque;	Barragem de Terra	- Correção de trincas; - Alteamento da cota da crista.
V	**Deslocamentos diferenciais entre blocos**	- Medidores Triortogonais - Extensômetro de Haste.	Barragem de Concreto	- Reforço estrutural com protensão;
VI	**Subpressão elevada na galeria de drenagem**	- Piezômetros	Barragem de Concreto	- Perfuração de drenos para alívio da subpressão

A adequada gestão das leituras e a interpretação de desvios frente aos níveis de controle e referência permitem transformar dados de instrumentação em subsídios efetivos à tomada de decisão. Essa lógica é exemplificada, a seguir, por meio de casos reais em que alterações nos padrões de leitura motivaram investigações complementares e a adoção de medidas corretivas.

3. ESTUDOS DE CASO

Este capítulo apresenta dois casos reais nos quais a interpretação integrada da instrumentação existente com inspeções visuais e análises teóricas foi fundamental para a identificação de anomalias, a avaliação de sua evolução e a definição de medidas de monitoramento e intervenção.

3.1. Caso histórico UHE Salto

A avaliação integrada dos dados de instrumentação foi determinante para a identificação, caracterização e delimitação das anomalias observadas na UHE Salto, especialmente os processos de carreamento de finos e ocorrência localizada de gradientes hidráulicos elevados. A análise da piezometria indicou, de forma consistente ao longo da barragem, pressões significativamente mais elevadas nos instrumentos instalados na fundação em comparação aos piezômetros posicionados no tapete drenante, evidenciando uma percolação preferencial concentrada no estrato

de fundação. Esse comportamento, registrado tanto na margem direita quanto na margem esquerda e no leito do rio, confirmou uma condição de permeabilidade da fundação superior à prevista em projeto, com capacidade limitada de dissipação de carga pelo sistema de drenagem existente.



Figura 9 – Vista geral da canaleta com presença de material argiloso – UHE Salto

O sistema de drenagem interno da barragem da margem direita é composto por filtro vertical, dreno horizontal e trincheira drenante no pé do aterro, além de canaleta de drenagem a jusante da trincheira.

A análise dos níveis d'água na região compreendida entre as estacas 3+0,00 e 6+0,00, onde estavam instalados os medidores de nível d'água NA002, NA003 e NA004, indicou valores próximos ou superiores à cota da tubulação do sistema de drenagem interno, o que constitui indício de insuficiência da capacidade drenante do sistema.

A Figura 10 apresenta um detalhe do pé da barragem, ilustrando a configuração da região ao final da construção, com a canaleta sob o aterro da berma no pé da barragem da margem direita. A figura destaca a tubulação do sistema de drenagem interno associada, com base nas leituras dos medidores de nível d'água, à insuficiência de drenagem observada.

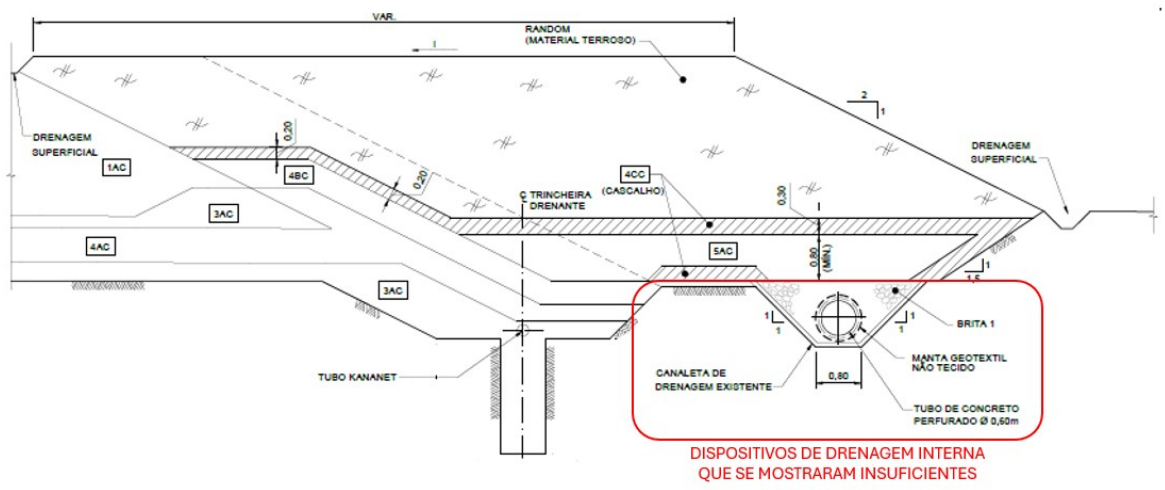


Figura 10 – Detalhe do pé da Barragem da Margem Direita – UHE Salto

Além dos dados de medição de nível d'água, a correlação entre os dados piezométricos e as leituras dos medidores de vazão permitiu identificar trechos específicos com maior aporte de fluxo, notadamente nas proximidades das ombreiras e em setores associados aos medidores MV-01A, MV-02A e MV-04. Embora as vazões medidas permanecessem significativamente abaixo dos valores de controle, a instrumentação evidenciou tendências localizadas de incremento e sazonalidade coerentes com as observações de campo, como a deposição de material fino em canaletas de drenagem, caixas de medidores de vazão e a ocorrência de fenômenos do tipo *sand boil*. Esses dados permitiram demonstrar que as anomalias identificadas não estavam associadas a um processo global de instabilização, mas sim a mecanismos localizados decorrentes da saturação do sistema de drenagem e do desenvolvimento de gradientes de saída suficientes para mobilizar partículas finas pouco coesivas através de descontinuidades construtivas.

Dessa forma, a instrumentação foi essencial não apenas para confirmar a origem hidrogeotécnica das anomalias, mas também para limitar sua extensão espacial, orientar inspeções direcionadas e evitar intervenções extensas desnecessárias, fundamentando tecnicamente a adoção de soluções localizadas e a definição de estratégias de monitoramento específicas para os trechos mais sensíveis da barragem [5].

Em função das observações realizadas em campo e das análises desenvolvidas a partir da instrumentação, foram preconizadas e executadas intervenções com foco na recuperação e no aprimoramento do sistema de drenagem interno. As ações concentraram-se na substituição do sistema de drenagem da margem direita, com a remoção das tubulações de concreto preexistentes, identificadas como hidraulicamente ineficientes, e implantação de nova drenagem constituída por tubos de PEAD perfurados, devidamente envoltos por materiais drenantes graduados. As obras incluíram escavações, recomposição do aterro compactado, adequações geométricas locais e implantação e ajuste de poços de visita. No leito do rio, foi executado um filtro invertido, associado a um medidor de vazões. Na margem esquerda, considerando as baixas vazões observadas, foram realizados reparos localizados nas canaletas de drenagem superficial. Durante todo o período de execução, a barragem foi acompanhada por meio de monitoramento sistemático da instrumentação geotécnica e hidráulica, não tendo sido registradas alterações adversas no comportamento da estrutura, o que confirmou a adequação e a eficácia das soluções adotadas [6].

3.2. Caso histórico UHE Capivara

A UHE Capivara situa-se no rio Paranapanema, afluente do rio Paraná, entre os municípios de Taciba (SP) e Porecatu (PR), tendo iniciado sua operação em 1976. A usina possui potência instalada de 643 MW e forma um reservatório área superficial de 623.70 km², no N.A. Máx. Maximorum.

As estruturas de concreto se dividem em vertedouro e tomada d'água/casa de força. O vertedouro se localiza na margem direita, e a tomada d'água/casa de força, no leito do rio, sob a barragem de terra. A barragem de terra está distribuída sobre a ombreira esquerda e sobre o leito do rio.

A UHE Capivara é um exemplo de barragem que passou por intervenções devido à ultrapassagem dos níveis de controle da instrumentação. Para esse caso, o aumento

dos níveis piezométricos acima dos níveis de controle estabelecidos apresenta histórico relevante.

Em 2002, houve um estudo de Reavaliação de Segurança de Barragens, elaborado pela Themag, no qual foi constatada a necessidade de instalação de piezômetros na casa de força, visto que essa estrutura não era monitorada. Em 2004, foram instalados os piezômetros 126 a 129 para monitoramento da fundação e do contato concreto/rocha (blocos 01 e 03 da casa de força), conforme recomendado [7].

A Figura 11 ilustra o local de instalação desses instrumentos em relação à unidade geradora da UHE Capivara.

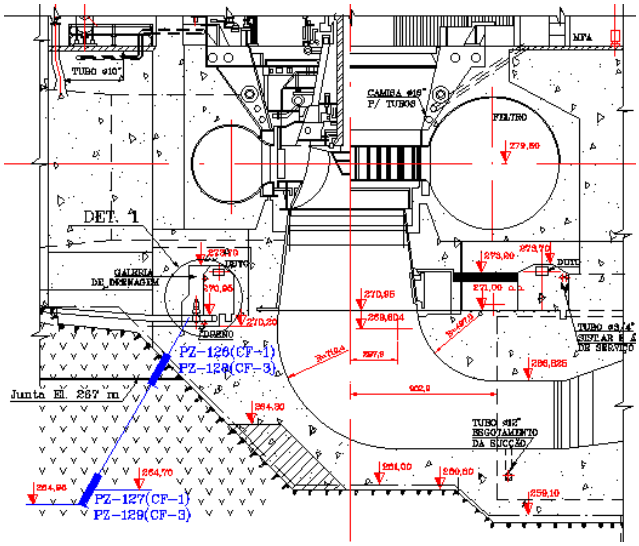


Figura 11 – Blocos 1 e 3 – PZ-126, PZ-127, PZ-128 e PZ-129

Fonte: Arquivo CTG Brasil (2018)

Em 2005, por meio do estudo de Revisão Periódica de Segurança, elaborado pela DAM Engenharia, foi constatado que:

> "As leituras obtidas no PZ-126 indicam que este instrumento apresenta valores de subpressão muito acima do estabelecido no projeto. [...] as leituras do instrumento indicam uma tendência de crescimento das subpressões, embora as variações do nível d'água do reservatório estejam no sentido oposto. [...] Tendo em vista as informações fornecidas pela Duke de que os instrumentos PZ-126, PZ-128 e PZ-129 estão funcionando adequadamente, com calibração e testes de funcionamento dentro do prazo de validade, recomenda-se a execução de uma cortina de drenagem na galeria transversal de montante da casa de força, com o objetivo de reduzir a subpressão nessa região" [8].

Adicionalmente:

> "Os fatores de segurança à flutuação (FSF) para várias hipóteses de subpressão não atendem aos critérios de segurança vigentes correspondentes a FSF > 1,3. Diante disto, recomenda-se a elaboração de um estudo detalhado visando o controle das subpressões na região da galeria transversal de montante da Casa de Força, por exemplo, a implantação de uma cortina de drenagem." [9].

Assim, em 2016 foi elaborado pela DESEK um estudo de alternativas para solucionar o problema, o qual contemplou a instalação de 4 piezômetros (PZ-136, PZ-137, PZ-138 e PZ-139), 12 drenos de alívio de pressão e 3 medidores triortogonais nas juntas de dilatação dos blocos 01/02, 02/03 e 03/04, cuja instalação ocorreu em 2017.

A Figura 12 ilustra os piezômetros instalados em 2017, enquanto a Figura 13 apresenta os valores de cota piezométrica dos piezômetros que já estavam instalados na Casa de Força e a diminuição desses valores após o ano de 2017, quando foram instalados os drenos de alívio de pressão na estrutura.



Figura 12 – Piezômetros PZ-136, PZ-137, PZ-138 e PZ-139 instalados em 2017.

Fonte: Arquivo CTG Brasil.

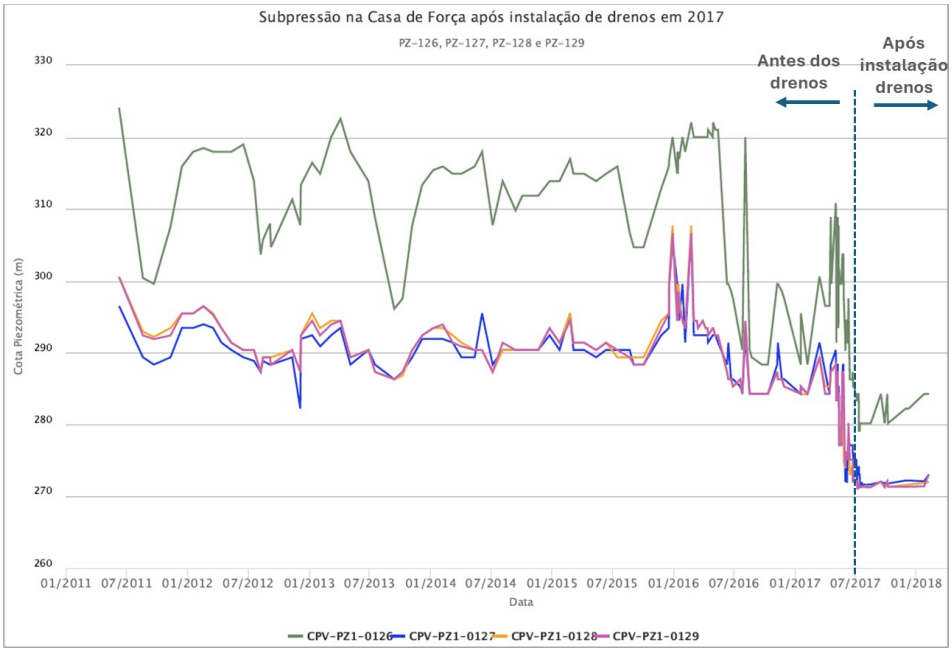


Figura 13 – Gráfico de cota piezométrica com destaque para a diminuição nos valores de subpressão após a instalação de drenos em 2017.

Fonte: Sysdam (2026)

Dessa maneira, tem-se que os resultados da instrumentação subsidiaram a adoção de medidas corretivas voltadas ao aprimoramento da segurança da barragem. Atualmente, a galeria da casa de força da UHE Capivara é devidamente monitorada e possui instrumentos suficientes para o adequado monitoramento de sua segurança.

4. CONCLUSÕES

A instrumentação de auscultação constitui elemento central da gestão da segurança de barragens, pois permite acompanhar o comportamento da estrutura e interpretar grandezas associadas aos principais modos de falha. Quando analisadas em conjunto com inspeções visuais, documentação de projeto, histórico construtivo e condições operacionais, suas leituras passam a atuar como suporte efetivo à tomada de decisão.

Nesse contexto, os níveis de controle e de referência são instrumentos relevantes para a triagem técnica de desvios de comportamento, permitindo identificar alterações em relação ao desempenho esperado da barragem. Sua função principal não é caracterizar, isoladamente, uma condição crítica, mas sinalizar a necessidade de aprofundamento das investigações e orientar inspeções, análises complementares e eventuais medidas corretivas.

O artigo evidencia que a definição desses níveis deve estar associada a hipóteses de comportamento e a critérios técnicos consistentes, com possibilidade de adoção de abordagens determinísticas, estatísticas e comparativas, conforme o tipo de instrumento, a disponibilidade de histórico e a fase de vida da barragem. Destaca-se, ainda, que esses parâmetros devem ser periodicamente reavaliados, especialmente nas Revisões Periódicas de Segurança.

Os estudos de caso apresentados confirmam essa aplicação. Na UHE Capivara, a ultrapassagem dos níveis piezométricos subsidiou medidas corretivas para alívio de subpressão na galeria da casa de força. Na UHE Salto, a interpretação integrada da piezometria, das vazões e das evidências de campo permitiu identificar processos localizados de percolação e carreamento de finos, orientar intervenções no sistema de drenagem e definir estratégias específicas de monitoramento.

Conclui-se, portanto, que os níveis de controle e de referência da instrumentação constituem importante ferramenta de gestão da segurança de barragens, por favorecerem a detecção precoce de desvios, reduzirem a subjetividade das análises e qualificarem o processo decisório. Sua efetividade, contudo, depende da confiabilidade das leituras, da adequada gestão da informação e da revisão periódica dos critérios adotados.

5. PALAVRAS-CHAVE

Instrumentação de Barragens; Níveis de Controle e de Referência; Gestão de Segurança de Barragens; Tomadas de Decisão; Estudos de Caso.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANA - Agência Nacional do Águas e Saneamento Básico (Brasil). Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens -- Brasília: ANA, 2016. 135 p. il. – (Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens).

[2] DUNNICLIFF, John. (1993) - Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. New York: John Wiley & Sons.

[3] INTERTECHNE CONSULTORES (2025) – "UHE Rosana – Revisão Periódica de Segurança de Barragens – Avaliação da instrumentação de auscultação – operacionalidade, revisão dos níveis de segurança e análise do comportamento – Relatório Técnico.

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17189: instrumentação em barragens — requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

[5] INTERTECHNE CONSULTORES (2018) – UHE Salto – Inspeção da Barragem – Diagnóstico da Situação e Recomendações – Relatório Técnico.

[6] INTERTECHNE CONSULTORES (2021) – UHE Salto – Obras de recuperação do sistema de drenagem – Relatório Final das Obras Civis.

[7] THEMAG (2002). Relatório de Níveis de Controle da Instrumentação e Estabelecimento de Frequência de Leituras. Estudo de Reavaliação de Segurança de Barragens na Usina Hidrelétrica Capivara, 6397-01-GL-420-RT-00012.

[8] DAM ENGENHARIA (2015) - Análise do Sistema de Auscultação das Estruturas de Concreto e Terra da UHE Capivara, 2015BVR-C-CP-RE-002.

[9] DAM ENGENHARIA (2015) - Análise de Desempenho das Estruturas de Concreto e Terra da UHE Capivara, 2015BVR-C-CP-RE-003.



Daniela Rodrigues RIBEIRO

Engenheira Civil pela UNESP (2017), mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos pelo ProfÁgua/UNESP (2021), especialista em Engenharia Geotécnica pela PUC Minas (2022), em Gerenciamento de Projetos pela FGV (2023) e em Segurança de Barragens pelo IDD (2026). Possui experiência em geotecnia aplicada a barragens e em Revisões Periódicas de Segurança. Atua na CTG Brasil como Engenheira Civil de Segurança de Barragens desde 2022.

	**Soraia Bastos KATERENIUK** Engenheira civil, mestre em Geotecnia, com experiência profissional em geotecnia de barragens e projetos de infraestrutura, atuando em estudos de viabilidade, projetos básicos e executivos e engenharia do proprietário. Tem participação em revisões periódicas de segurança em barragens de usinas hidroelétricas, desenvolvimento de projetos de instrumentação de barragens e acompanhamento do comportamento destas estruturas.
	**Rodrigo Miranda CARVALHO** Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa, Especialista em Segurança de Barragens pelo Instituto IDD, MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas. Engenheiro Civil de Segurança de Barragens pela Duke Energy (de 2011 a 2016), Engenheiro Civil de Segurança de Barragens pela CTG Brasil (de 2017 à março de 2019), Coordenador de Engenharia Civil pela CTG Brasil (abril de 2019 – o momento).
	**Pedro Nunes PEREIRA** Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa, MSc Engenharia pela USP, MBA Gestão de Negócios pela FDC, MBA Gestão de Projetos pela FGV. Gerente de Engenharia Civil e Segurança de Barragens pela CTG Brasil desde 2017 e Duke Energy (2008-2016), com ampla experiencia na gestão de projetos e empreendimentos hidrelétricos, programas de segurança de barragens, PAE, monitoramento hidrológico e manutenção civil.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

PONDERAÇÕES SOBRE PROBLEMAS COMUNS NA OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS REFERENTES AO MONITORAMENTO DE BARRAGENS POR MEIO DE INSTRUMENTAÇÃO

Marina FERREIRA
Engenheira Civil - Pimenta de Ávila Consultoria

Marcos Filho PIMENTA
Engenheiro Civil - Pimenta de Ávila Consultoria

Marcos PIMENTA
Engenheiro Civil - APEL - Ávila Pimenta Engenharia

Sebastião SILVA
Engenheiro Civil - Engeboard – Projetos e Consultoria

Wellerson BASTOS
Engenheiro Civil - Pimenta de Ávila Consultoria

RESUMO

O monitoramento das barragens, mediante a realização de inspeções e auscultação, é fundamental para a segurança das estruturas e para a gestão de riscos. Este trabalho tem como objetivo discutir alguns problemas que têm sido observados com certa frequência, pelos autores, nas atividades de obtenção, tratamento e análise de dados obtidos de forma direta no monitoramento de barragens e demais estruturas de usinas hidrelétricas. A abordagem apresentada baseia-se na experiência prática dos autores em atividades de monitoramento e gestão da instrumentação de barragens, por meio da análise de situações recorrentes identificadas em diferentes empreendimentos, especialmente em usinas hidrelétricas mais antigas. Os problemas observados foram organizados / sistematizados em categorias, destacando-se, entre outros: ausência de cadastro atualizado e de informações sobre o status operacional dos instrumentos; necessidade de inventário da instrumentação instalada; instrumentos danificados, sem leituras ou com frequências inadequadas de auscultação; procedimentos incorretos de leitura e processamento dos dados; indisponibilidade de desenhos e de outros documentos referentes ao projeto das estruturas e da instrumentação; informações detalhadas sobre as fundações das estruturas; ausência de limites de controle para os parâmetros monitorados e deficiência no treinamento das equipes responsáveis. O trabalho apresenta uma análise sistematizada dos problemas, bem como sugestões e recomendações voltadas ao aprimoramento da qualidade e da confiabilidade dos dados de auscultação e das avaliações de segurança das estruturas.

ABSTRACT

Dam monitoring, through inspections and instrumentation monitoring, is essential for ensuring structural safety and effective risk management. This paper aims to discuss several issues that the authors have frequently observed in the activities of acquiring, processing, and analyzing data obtained directly from the monitoring of dams and other structures at hydroelectric power plants. The approach presented is based on the authors' practical experience in dam monitoring and instrumentation management, through the analysis of recurring situations identified at different facilities, particularly older hydroelectric power plants. The observed issues were organized and systematized into categories, including, among others: the absence of an updated inventory and information on the operational status of instruments; the need for an inventory of the installed instrumentation; damaged instruments, instruments without readings, or instruments monitored at inadequate frequencies; incorrect procedures for data acquisition and processing; the unavailability of drawings and other documents related to the design of the structures and their instrumentation; lack of detailed information on the foundations of the structures; absence of control limits for the monitored parameters; and insufficient training of the responsible teams. The paper presents a systematic analysis of these issues, together with suggestions and recommendations aimed at improving the quality and reliability of instrumentation monitoring data and the safety assessments of the structures.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de barragens constitui uma atividade fundamental para a segurança estrutural, operacional e ambiental dessas obras de engenharia, especialmente considerando os impactos potenciais associados a eventuais acidentes ou rupturas.

Um modo de falha potencial caracteriza-se como o mecanismo fisicamente possível que resulta na ruptura ou na danificação de uma barragem. Este processo é motivado, entre outros fatores, por deficiências associadas às características da fundação, falhas de projeto e execução, materiais utilizados, inconformidades na operação e manutenção ou pelo desgaste natural da estrutura ao longo do tempo [1]. Nesse contexto, o monitoramento das estruturas, realizado por meio de inspeções visuais e instrumentação, representa uma das principais ferramentas para avaliação contínua do comportamento das barragens ao longo de sua vida útil.

O monitoramento por meio da instrumentação permite a obtenção de dados quantitativos relacionados ao comportamento geotécnico, estrutural e hidráulico das barragens, possibilitando a identificação de alterações que possam indicar condições anômalas ou o desenvolvimento de mecanismos de falha. Além disso, a instrumentação possibilita o acompanhamento das respostas das estruturas frente às diferentes condições de carregamento, incluindo variações de nível d'água, precipitações, carregamentos operacionais e eventos extremos [2,3]. A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída por [4], estabelece a obrigatoriedade da manutenção e análise contínua dos dados de instrumentação das barragens, destacando sua relevância para a gestão da segurança dessas estruturas.

Entretanto, apesar da reconhecida importância do monitoramento por meio da instrumentação, observa-se que diversas dificuldades ainda comprometem a obtenção e a análise confiável dos dados obtidos. Em muitos empreendimentos, especialmente em usinas hidrelétricas mais antigas, verifica-se a ausência de informações básicas sobre a instrumentação instalada, incluindo desenhos de projeto executivo, memoriais descritivos, cadastro atualizado dos instrumentos e informações sobre o status operacional. Em alguns casos, há também ausência de dados históricos organizados, inexistência de limites de controle adequadamente definidos e deficiência nos procedimentos de leitura, gestão e interpretação das informações obtidas.

Além disso, problemas como instrumentos danificados, falhas de calibração, leituras inconsistentes, erros operacionais e frequências inadequadas de monitoramento podem comprometer significativamente a confiabilidade dos dados. Conforme [5], erros associados à instalação, operação e interpretação da instrumentação podem conduzir a análises equivocadas sobre o comportamento das estruturas, prejudicando a identificação precoce de situações potencialmente críticas.

Outro aspecto relevante refere-se ao fator humano envolvido nas atividades de monitoramento. Equipes insuficientemente treinadas e procedimentos inadequados de leitura, frequentemente resultam em inconsistências nos dados e em dificuldades para avaliação adequada do comportamento das estruturas.

Dessa forma, a obtenção de dados confiáveis e sua interpretação dependem não apenas da instrumentação instalada, mas também de um conjunto integrado de

fatores, incluindo a adequada concepção do sistema de monitoramento, a correta instalação e manutenção dos instrumentos, a utilização de equipamentos de medição devidamente calibrados, a disponibilidade de documentação técnica, a definição de critérios de análise e limites de controle, bem como a capacitação contínua das equipes responsáveis pelas atividades de auscultação.

O presente trabalho discute alguns problemas frequentemente observados durante as atividades de obtenção e análise de dados de monitoramento de barragens por meio da instrumentação, com enfoque em estruturas de usinas hidrelétricas. São abordadas dificuldades relacionadas ao cadastro e à gestão dos dados da instrumentação, à ausência de documentação técnica, às falhas operacionais nos procedimentos de leitura e análise, à inexistência de limites de controle e à capacitação das equipes envolvidas. Busca-se, assim, contribuir para o aprimoramento das rotinas de monitoramento e para o aumento da confiabilidade das análises realizadas no contexto da segurança de barragens.

2. MONITORAMENTO DE BARRAGENS POR MEIO DA INSTRUMENTAÇÃO

2.1. Objetivos da auscultação

A auscultação de barragens corresponde ao processo contínuo de acompanhamento e avaliação do comportamento das estruturas ao longo de sua vida útil, tendo como uma de suas principais ferramentas a instrumentação [5]. Seu principal objetivo consiste em fornecer informações que permitam verificar se o comportamento real da estrutura está compatível com as premissas consideradas em projeto, possibilitando a identificação precoce de situações anômalas e subsidiando a tomada de decisões relacionadas à segurança da barragem.

De acordo com [6], um programa adequado de monitoramento deve possibilitar a detecção de comportamentos que possam comprometer a segurança da estrutura, permitindo a implementação de medidas preventivas e corretivas antes que condições críticas se desenvolvam. Nesse contexto, a instrumentação desempenha papel fundamental, uma vez que fornece dados quantitativos capazes de complementar as observações visuais realizadas durante as inspeções.

Segundo [3], a instrumentação apresenta diversas vantagens para o monitoramento de barragens, dentre as quais destacam-se: a obtenção de registros contínuos e consistentes ao longo do tempo, a possibilidade de monitoramento de parâmetros internos não observáveis visualmente e a detecção de tendências sutis de comportamento.

Conforme [2], a instrumentação deve ser concebida de forma que cada instrumento instalado possua um objetivo claramente definido. Conforme a fase do empreendimento, os objetivos podem estar associados à obtenção e/ou verificação de premissas e critérios de projeto e/ou à obtenção de parâmetros relevantes para a segurança da estrutura. O sistema de monitoramento deve ser planejado considerando os possíveis modos de falha da barragem, as características geológicas e geotécnicas da fundação, os critérios de projeto e as condições operacionais do empreendimento.

Nesse sentido, os principais objetivos da auscultação podem ser resumidos em:

- Acompanhar o comportamento geotécnico, estrutural e hidráulico da barragem;
- Verificar o desempenho da estrutura frente às condições de carregamento;
- Detectar alterações de comportamento que possam indicar desenvolvimento de anomalias ou modos de falha;
- Avaliar a eficiência dos sistemas de drenagem e impermeabilização;
- Subsidiar inspeções, análises de segurança e revisões periódicas;
- Fornecer informações para definição de ações corretivas e preventivas;
- Contribuir para o aprimoramento de critérios de projeto e operação.

Conforme [7], os programas de monitoramento devem estar diretamente relacionados aos riscos associados à estrutura e aos modos de falha considerados mais relevantes. Assim, os parâmetros monitorados devem permitir a avaliação contínua das condições de estabilidade, percolação, deformação, deslocamento e comportamento das fundações, entre outros fatores.

2.2. Importância da instrumentação para a segurança de barragens

A segurança das barragens depende diretamente da capacidade de identificar alterações de comportamento antes que elas evoluam para situações críticas. Nesse contexto, a instrumentação constitui uma das principais ferramentas para avaliação contínua das condições de segurança das estruturas.

Segundo [8], diversos acidentes envolvendo barragens poderiam ter sido precedidos pela identificação de sinais de alerta, caso houvesse programas robustos de monitoramento e interpretação adequada dos dados obtidos pela instrumentação. Conforme [5], a instrumentação somente cumprirá plenamente sua função se os dados obtidos forem analisados de forma contínua e criteriosa. A análise ágil dos dados de leituras, com detecção precoce de alterações nos parâmetros monitorados é essencial para a definição de ações que possuam o objetivo de evitar o desenvolvimento progressivo de mecanismos de falha.

Os sistemas de monitoramento devem ser pensados de forma a acompanhar não somente as solicitações atuantes na estrutura, mas também os diferentes parâmetros relacionados ao comportamento da barragem ao longo do tempo. Fatores externos, como condições meteorológicas, variações hidrológicas e movimentações, podem gerar deformações, variações térmicas no corpo da barragem, alterações nas pressões hidrostáticas e modificações nas condições de percolação. A interpretação dos dados provenientes da instrumentação permite avaliar tanto o comportamento imediato quanto a evolução das condições da estrutura em longo prazo. A Tabela 1 apresenta alguns dos principais parâmetros para o monitoramento de barragens e de suas fundações, conforme indicado em [6].

Tabela 1 – Parâmetros significativos para o monitoramento do comportamento da barragem e de suas fundações.

Barragem de concreto	Barragem de aterro	Fundações
Deformações estruturais	Deformações do corpo da barragem	Deformações por movimentação de pilares

Barragem de concreto	Barragem de aterro	Fundações
Movimentos especiais (fissuras, juntas)	Deslocamentos especiais (interfaces com estruturas de concreto)	Deslocamentos especiais (fissuras, diaclases)
Temperatura do corpo da barragem	Temperatura para detectar infiltrações (possível)	Temperatura para detectar infiltrações (possível)
Pressões de subpressão (contato concreto-fundação e no maciço rochoso)	Poropressões no corpo da barragem e nível piezométrico	Poropressão, pressão de subpressão em profundidade, nível piezométrico e nível da linha freática.
Taxas de infiltração e drenagem	Taxas de infiltração e drenagem	Taxas de infiltração e drenagem e ressurgimentos (fontes)
Análise química da água de infiltração Turbidez (possível)	Análise química da água de infiltração Turbidez	Análise química da água de infiltração Turbidez

Fonte: [6], Cap.4. Nota: Texto original traduzido do inglês pelos autores.

Além disso, [6] destaca que os sistemas de vigilância devem ser capazes de detectar comportamentos anômalos relacionados aos principais modos de falha das barragens, incluindo:

- Erosão interna;
- Instabilidade de taludes;
- Galgamento;
- Deformações excessivas;
- Problemas relacionados às fundações, interfaces e ombreiras.

Outro aspecto importante refere-se à automatização da instrumentação. Conforme [9], a utilização de sistemas automatizados possibilita monitoramento contínuo e maior frequência de aquisição de dados, especialmente em locais de difícil acesso ou sujeitos a condições operacionais adversas. Contudo, a automatização também resulta em grandes volumes de informações, aumentando a necessidade de ferramentas e metodologias capazes de avaliar a consistência e a confiabilidade dos dados obtidos.

A instrumentação deve ser entendida como parte integrante de um sistema de gestão da segurança da barragem, envolvendo aquisição, o armazenamento a análise e a interpretação de dados, subsidiando, juntamente com outras formas de observação, a tomada de decisão, conforme esquematizado na Figura 1.



Figura 1 – Sistema integrado de gestão de segurança de barragens.

Fonte: elaborado pelos autores.

3. INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA O MONITORAMENTO POR MEIO DA INSTRUMENTAÇÃO E PROBLEMAS COMUNS RELACIONADOS

3.1. Informações básicas necessárias

O monitoramento de barragens por meio da instrumentação depende da integração entre informações técnicas consistentes, procedimentos operacionais padronizados e equipes devidamente capacitadas.

Segundo [6], os sistemas de monitoramento devem ser concebidos de forma a possibilitar não apenas a obtenção das leituras, mas também a adequada compreensão do comportamento da barragem ao longo do tempo, considerando suas condições estruturais, geotécnicas, hidráulicas e operacionais. Nesse contexto, o conhecimento das premissas de projeto, das características da fundação e dos critérios de monitoramento adotados é indispensável para que as análises sejam realizadas, permitindo distinguir o comportamento de cada componente da estrutura.

Falhas relacionadas ao cadastro da instrumentação, à ausência de documentação técnica (como desenhos de projeto e desenhos *as-built*), à utilização de procedimentos de leitura inadequados ou ao treinamento insuficiente das equipes podem comprometer significativamente a qualidade do monitoramento e dificultar a identificação precoce de comportamentos anômalos. A interpretação dos dados de instrumentação deve ser conduzida por profissionais capacitados.

De acordo com [5], diversos problemas observados em barragens estão relacionados à deficiência na gestão das informações e na capacitação das equipes responsáveis pelo monitoramento. Para que os máximos benefícios sejam extraídos do monitoramento por meio da instrumentação, os dados de registros devem estar disponíveis para análise imediatamente após o término da realização/validação das campanhas de leitura, onde a etapa de validação deve ocorrer de maneira ágil, tendo

em vista que o acesso tardio pode acarretar na detecção tardia de possíveis alterações dos comportamentos indicados pelos instrumentos, as quais podem refletir problemas relacionados aos instrumentos ou mesmo às estruturas nas quais estes se encontram instalados. Destaca-se que as análises devem compreender, inicialmente, a verificação da consistência dos dados obtidos. Isso deve ser realizado logo após a realização das leituras, para que, se necessário, elas sejam repetidas o mais breve possível. A seguir, é importante comparar os valores lidos com as últimas leituras obtidas anteriormente, para que seja verificada eventual alteração de comportamento das estruturas; essa comparação é mais efetiva se realizada após a plotagem dos valores lidos em gráficos (avaliação visual de tendência) que, portanto, deve ser realizada com agilidade. Finalmente, as leituras devem ser avaliadas, também com agilidade, pelo engenheiro responsável pela segurança da barragem. De acordo com a sistemática implantada em cada empreendimento, pode haver níveis intermediários de ações e responsabilidades, visando adiantar as análises e favorecer a identificação mais rápida de eventuais anomalias.

Dessa forma, torna-se fundamental que o sistema de auscultação seja estruturado de maneira integrada e holística, envolvendo tanto aspectos técnicos relacionados às estruturas quanto procedimentos operacionais voltados à obtenção, organização e interpretação dos dados e sistematização dos processos de obtenção e análise de dados. Nesse contexto, os principais aspectos necessários para o adequado monitoramento por instrumentação podem ser organizados em dois grupos: informações técnicas básicas do empreendimento e procedimentos operacionais relacionados à execução e gestão do monitoramento.

Para que os dados de instrumentação sejam devidamente interpretados, é necessário que as equipes responsáveis pelo monitoramento possuam acesso às principais informações técnicas relacionadas às estruturas monitoradas. Entre essas informações, destacam-se:

- Critérios de projeto civil, importantes para avaliar o comportamento esperado da estrutura;
- Características dos maciços de fundação e das estruturas, incluindo o mapeamento geológico e os tratamentos realizados [2];
- Memorial descritivo e desenhos de locação do projeto de instrumentação, para evitar a perda total de instrumentos por falta de identificação ou localização errônea [2];
- Cadastro e inventário da instrumentação com armazenamento não apenas das leituras realizadas, mas também do conjunto de constantes e especificações técnicas de cada instrumento/sensor [5];
- Status operacional e histórico de leituras, para diferenciar falhas da instrumentação de problemas estruturais [7];
- Limites de controle definidos na etapa de projeto (determinísticos) e valores de referência definidos por meio de indicadores de desempenho (estatísticos), os quais permitem o diagnóstico precoce de anomalias [10].

A disponibilidade dessas informações permite compreender o comportamento esperado da estrutura, correlacionar os dados obtidos com as condições operacionais

do empreendimento e avaliar adequadamente possíveis alterações observadas ao longo do monitoramento [5,6].

O monitoramento eficiente depende da existência de procedimentos operacionais adequados, como a padronização dos procedimentos de leitura, a capacitação e treinamento contínuo dos profissionais envolvidos, o conhecimento acerca da funcionalidade dos instrumentos, a identificação de anomalias no campo e a gestão e organização dos dados obtidos.

Tais procedimentos contribuem para aumentar a rastreabilidade e a confiabilidade dos dados obtidos. Além disso, equipes devidamente treinadas apresentam maior capacidade para identificar inconsistências e adotar medidas adequadas diante de situações anômalas [2,7].

3.2. Problemas comuns relacionados ao monitoramento por meio da instrumentação

A eficácia do sistema de monitoramento por meio da instrumentação pode ser comprometida por diversos problemas comuns, inclusive, relacionados à deficiência de informações básicas. Na Tabela 2, apresentam-se alguns problemas relacionados a este tema:

Tabela 2 – Principais problemas relacionados ao tema e ações recomendadas.

Problema identificado	Impactos no monitoramento	Ações recomendadas	Referências
Ausência de cadastro e inventário da instrumentação	Compromete a rastreabilidade das informações e dificulta a interpretação adequada dos dados.	Realização de inventário completo, realização de levantamento topográfico e atualização dos dados de cadastro.	[2], [5]
Ausência de desenhos e documentação técnica	Dificulta a compreensão do sistema de monitoramento e limita análises de segurança e inspeções futuras.	Consolidação de desenhos "*as built*" da instrumentação, memoriais descritivos e documentos de projeto das estruturas.	[6], [7]
Instrumentos ou equipamentos de medição danificados	Redução da confiabilidade das leituras ou ausência de monitoramento.	Manutenção, substituição e verificação periódica do status operacional dos instrumentos. Verificação e calibração periódica dos equipamentos de medição.	[2], [3], [6]
Instrumentos sem leituras ou com frequência inadequada	Dificulta a identificação precoce de anomalias e fenômenos de evolução rápida.	Definição adequada das frequências de leitura e intensificação do monitoramento em situações críticas.	[2], [8]
Procedimentos incorretos de leitura	Resulta em inconsistências nos dados, perda de	Padronização dos procedimentos de campo e capacitação contínua das	[2]

Problema identificado	Impactos no monitoramento	Ações recomendadas	Referências
	confiabilidade e erros nas análises.	equipes.	
Erros nos cálculos e na conversão de dados	Compromete a confiabilidade dos parâmetros interpretados.	Automatização das rotinas de cálculo e validação das equações utilizadas.	[5], [11]
Ausência de limites de controle adequadamente definidos	Pode reduzir a capacidade de detecção precoce de comportamentos anômalos.	Implementação de limites de controle determinísticos e estatísticos.	[5]
Falhas no armazenamento e gestão dos dados	Compromete a rastreabilidade e dificulta análises históricas e integradas.	Implantação de sistemas estruturados de gestão de dados e verificação de consistência.	[5], [6]

Fonte: Adaptado pelos autores de [2], [3], [5], [6], [7], [8] e [11].

4. PLANEJAMENTO, FREQUÊNCIA E REALIZAÇÃO DAS CAMPANHAS DE MONITORAMENTO

4.1. Planejamento das campanhas

O planejamento das campanhas de leitura da instrumentação é essencial para garantir a obtenção de dados confiáveis e compatíveis com as necessidades de monitoramento da segurança das barragens. A programação das atividades deve considerar não apenas a frequência de leitura dos instrumentos, mas também as características das estruturas monitoradas, as condições operacionais do empreendimento e os possíveis modos de falha associados.

A definição das campanhas deve levar em consideração fatores como o tipo de instrumento e da grandeza monitorada, a relevância da estrutura monitorada, o histórico de comportamento observado, as condições hidráulicas e operacionais vigentes e as recomendações técnicas usualmente adotadas para barragens, incluindo orientações do Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) e da ICOLD.

Além disso, recomenda-se que o planejamento seja elaborado por estrutura, de forma que os instrumentos pertencentes a ela sejam lidos na mesma campanha e, sempre que possível, no mesmo dia. Essa abordagem reduz defasagens temporais entre leituras e permite interpretações mais consistentes do comportamento da estrutura sob uma mesma situação operacional e hidráulica. O planejamento também deve contemplar:

- Definição prévia das estruturas e instrumentos a serem monitorados;
- Organização das equipes de campo;
- Verificação das condições de acesso;
- Disponibilidade dos equipamentos necessários;
- Cronograma de execução das leituras;
- Definição dos procedimentos de segurança aplicáveis às atividades de campo.

Adicionalmente, o planejamento deve prever flexibilidade operacional para intensificação das leituras em situações específicas, tais como alterações rápidas do nível do reservatório, eventos hidrológicos excepcionais, identificação de tendências desfavoráveis ou ocorrência de anomalias estruturais.

4.2. Frequência de realização das leituras

A frequência das leituras deve considerar as diferentes fases do empreendimento (projeto, construção, enchimento do reservatório e operação), devendo ser compatível com a criticidade da estrutura, com o tipo de grandeza monitorada e com a velocidade esperada ou observada para as suas variações. As frequências de leituras dos diferentes instrumentos não devem ser tratadas de forma rígida e padronizada, devendo refletir as particularidades de cada estrutura e dos parâmetros monitorados [3, 5]. Com base em sua experiência em trabalhos de instrumentação de barragens, os autores consideram que o grau de uniformidade dos valores lidos deve ser considerado na flexibilização das frequências de leituras, tanto para mais como para menos.

Conforme [12], nos períodos iniciais de enchimento e operação de um reservatório, a frequência de monitoramento da instrumentação deve ser intensificada devido à transição para o regime de percolação permanente, fase estatisticamente crítica para a segurança estrutural dos aterros. Posteriormente, à medida que os dados convergem para os parâmetros previstos em projeto e demonstram estabilização, a periodicidade das leituras pode, muitas vezes, ser flexibilizada.

Sendo assim, de maneira geral, a definição das frequências de realização das leituras deve considerar aspectos como a fase de operação da barragem, o comportamento histórico da instrumentação, a relevância do instrumento para identificação de modos de falha, as condições hidráulicas e operacionais e a estabilidade observada nas leituras, entre outros fatores.

Ressalta-se que o acompanhamento contínuo dos níveis d’água de montante e jusante possui importância especial no monitoramento de barragens de hidrelétricas, uma vez que grande parte das respostas observadas na instrumentação depende diretamente das condições de carregamento hidráulico atuantes.

4.3. Realização das campanhas

A realização adequada das campanhas de monitoramento depende da disponibilidade de recursos humanos, materiais e operacionais compatíveis com a complexidade das atividades de campo [5]. Outro aspecto importante refere-se à necessidade de manutenção da infraestrutura de monitoramento, incluindo as cabines de leitura, caixas de proteção, acessos, sistemas automatizados e dispositivos auxiliares, entre outros itens, de forma a garantir condições adequadas para obtenção das leituras.

Os roteiros de leitura devem ser previamente analisados e definidos, buscando facilitar a execução organizada das campanhas de auscultação e reduzir a possibilidade de falhas operacionais ou a impossibilidade de acesso. Tal recomendação resulta de constatações verificadas na prática.

O registro adequado das leituras e das observações realizadas durante as campanhas de monitoramento é fundamental para garantir rastreabilidade, organização e confiabilidade das informações obtidas. Além das medições, devem ser registradas informações complementares que possam auxiliar na interpretação futura dos dados, como por exemplo condições climáticas, ocorrências operacionais relevantes, dificuldades encontradas durante a leitura, condições de acesso e conservação dos instrumentos etc. Após a realização das campanhas, os dados devem ser consolidados e incorporados ao sistema de gestão da instrumentação adotado no empreendimento. Com isso, destaca-se que o adequado registro das informações de campo constitui etapa essencial para garantir qualidade ao processo de monitoramento e suporte técnico às avaliações de segurança das barragens.

A Figura 2 apresenta um fluxograma que sintetiza os procedimentos que devem ser adotados no que se refere ao planejamento, à realização das campanhas de monitoramento e à gestão dos dados obtidos.



Figura 2 – Fluxograma dos procedimentos de planejamento, realização das leituras, consolidação e gestão dos dados obtidos.

Fonte: elaborado pelos autores.

5. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE INSTRUMENTOS

De acordo com [12], "*Uma vez garantida a qualidade dos dados da instrumentação é essencial que seja realizada a análise periódica desses dados por especialista familiarizado com o projeto, construção e operação da barragem*".

Nesse contexto, o relatório de análise da instrumentação deve ser elaborado de forma clara, objetiva, tecnicamente fundamentada e conclusiva, de modo a apresentar uma avaliação adequada sobre o comportamento das barragens e das demais estruturas

civis. Esse relatório deve consolidar os resultados das leituras, a verificação da consistência das medições, a interpretação dos dados, a avaliação de tendências, a comparação com os níveis de controle e a identificação de eventuais anomalias ou comportamentos atípicos.

A elaboração do relatório não deve se limitar à simples apresentação de tabelas e gráficos. É necessário que os dados sejam analisados de forma crítica pelo engenheiro responsável pela segurança das estruturas, buscando-se, se necessário, correlacionar os dados do monitoramento por meio da instrumentação com as condições hidráulicas, operacionais, ambientais e estruturais verificadas no período, assim como nas observações das inspeções periódicas das estruturas. O objetivo é produzir documento técnico capaz de subsidiar a avaliação do desempenho das estruturas e apoiar a tomada de decisão quanto à operação, manutenção, necessidade de investigação complementar e eventual definição e execução de medidas corretivas.

No caso de instrumentos sem histórico suficiente, que não possuam documentação técnica contendo dados descritivos relevantes, tais como sua finalidade, princípio de funcionamento, forma de leitura e parâmetros esperados para o monitoramento da estrutura, não se recomenda a definição de critérios de análise sem a consolidação dessas informações. Nessas situações, o relatório deve registrar a limitação existente e recomendar a complementação do cadastro técnico antes da incorporação desses dispositivos à rotina de monitoramento.

5.1. Verificação da consistência dos dados

A verificação da consistência dos dados constitui uma das etapas mais importantes do processo de análise da instrumentação, uma vez que a confiabilidade da análise realizada depende diretamente da qualidade das informações. Antes da interpretação do comportamento das estruturas, deve ser realizada uma avaliação crítica das leituras obtidas, buscando identificar inconsistências, erros operacionais, falhas dos instrumentos ou comportamentos incompatíveis com as condições esperadas (que, entretanto, não devem ser descartados antes de sua verificação). Essa avaliação deve ser realizada logo após a consolidação das leituras de cada campanha, contemplando, no mínimo, a comparação com leituras anteriores, a verificação da coerência dos dados obtidos e a correlação com condições observadas no período. Como comentado anteriormente, tal comparação é mais efetiva se realizada visualmente, após a plotagem de gráficos.

Deve-se avaliar a possibilidade de que inconsistências estejam associadas a problemas relacionados ao próprio sistema de monitoramento, tais como falhas de calibração, danos nos instrumentos, erros de leitura, problemas cadastrais ou interferências externas. A Figura 3 apresenta alguns aspectos que devem ser considerados na verificação da consistência dos dados.

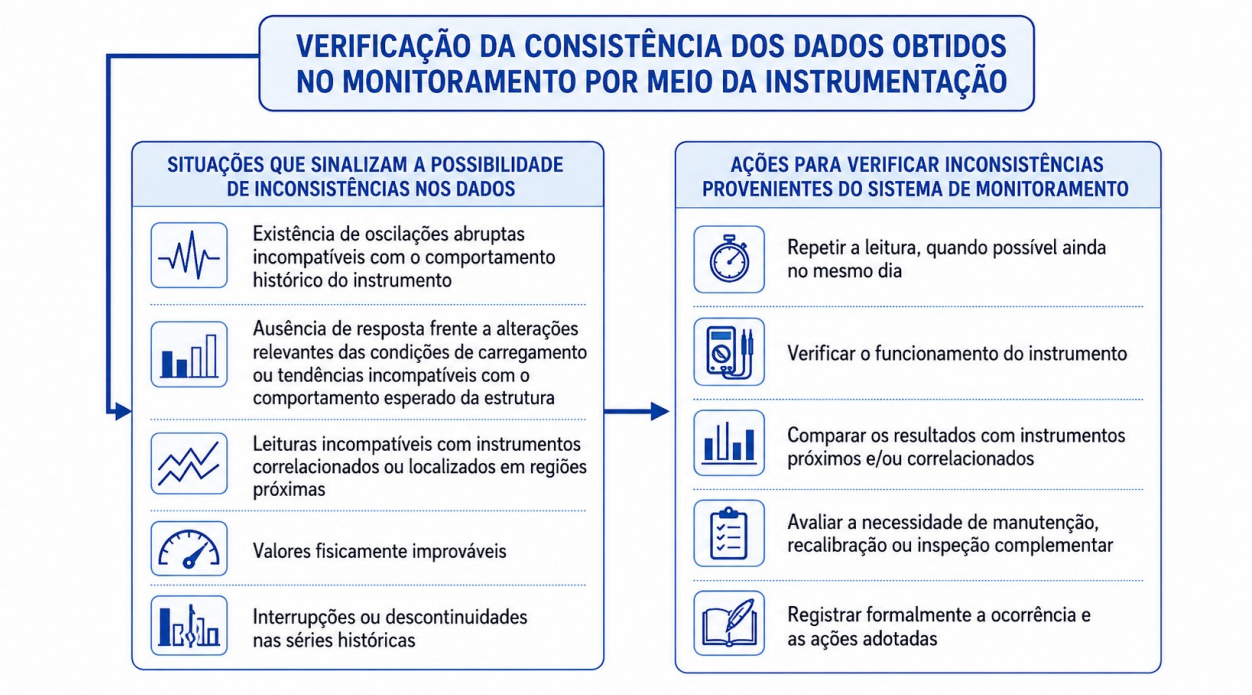


Figura 3 – Aspectos de verificação da consistência dos dados obtidos no monitoramento por meio da instrumentação.

Fonte: elaborado pelos autores.

Dessa forma, a verificação sistemática da consistência dos dados contribui para aumentar a confiabilidade das análises e reduzir a probabilidade de interpretações equivocadas sobre o comportamento das estruturas monitoradas.

5.2. Avaliação de tendências, comportamento das estruturas e comparação com os limites de controle

A avaliação das tendências e a comparação das leituras com limites de referência e/ou de controle são aspectos importantes para a interpretação do comportamento das barragens e identificação precoce de possíveis anomalias. Essa análise não deve se restringir à observação pontual de valores isolados, mas considerar também a evolução temporal das leituras, as taxas de variação, a repetição de comportamentos sazonais e a influência das condições hidráulicas, operacionais e ambientais atuantes sobre a estrutura [13].

Portanto, recomenda-se avaliar padrões de aumento, redução, estabilização ou oscilações cíclicas das grandezas monitoradas, bem como alterações abruptas ou tendências persistentes não esperadas para o comportamento da estrutura. A interpretação dos dados deve considerar fatores como níveis d'água de montante e jusante, diferencial de carga hidráulica, precipitações, sazonalidade hidrológica, temperatura ambiente e condições operacionais específicas do empreendimento.

Além disso, análises estatísticas podem ser utilizadas como ferramenta complementar para quantificar correlações entre os parâmetros monitorados e as variáveis que possam influenciar nas respostas da instrumentação, como por exemplo, na definição de limites de desempenho, proporcionando maior assertividade às interpretações realizadas [13]. A análise das taxas de variação também possui grande importância;

em especial, as variações significativas ou mudanças abruptas de tendência podem indicar alterações no comportamento da estrutura ou problemas relacionados ao próprio instrumento ou ao processo de leituras ou de cálculos. [5]

Comportamentos anômalos podem se manifestar por meio de leituras abruptamente alteradas, oscilações excessivas, ausência de resposta às condições de carregamento, divergências em relação a instrumentos próximos e/ou correlacionados ou mesmo da superação de limites de referência e de controle. Entretanto, a ocorrência isolada de uma leitura atípica não deve ser interpretada automaticamente como indicativo de condição crítica, sendo necessária uma avaliação integrada envolvendo o histórico do instrumento, inspeções visuais, condições operacionais, dados hidráulicos e demais informações pertinentes.

A comparação das leituras com níveis de controle constitui uma importante ferramenta de apoio à gestão da segurança das estruturas. Esses limites podem possuir natureza determinística, baseada em critérios de projeto, ou estatística, fundamentada no comportamento histórico da instrumentação. Os limites estatísticos são particularmente úteis para identificação precoce de desvios em relação ao padrão histórico de comportamento, antes mesmo que sejam atingidas condições críticas definidas em projeto [5].

Sempre que ocorrer superação dos limites de referência, de controle ou a identificação de comportamentos potencialmente anômalos, recomenda-se confirmar a consistência das leituras incluindo os aspectos abordados no item 5.1, verificar a coerência com instrumentos correlacionados ou localizados em região próxima, avaliar as condições operacionais do período, intensificar o monitoramento e registrar formalmente as ocorrências e as ações adotadas. Contudo, ressalta-se que a superação de limites de referência ou de controle não implicam, necessária e isoladamente, uma condição alarmante da estrutura, devendo a interpretação final estar associada à análise integrada dos dados e ao julgamento técnico do engenheiro responsável pela segurança da barragem [5].

6. SISTEMATIZAÇÃO DE GESTÃO DOS DADOS E PLANO DE AÇÕES

A gestão adequada dos dados de instrumentação é de suma importância para a confiabilidade das análises e subsidiar a tomada de decisão relacionada à segurança das barragens. Dessa forma, recomenda-se que os dados de monitoramento sejam armazenados em bases padronizadas, continuamente atualizadas e integradas às demais informações do empreendimento, incluindo dados hidráulicos, operacionais, meteorológicos e inspeções visuais.

Segundo [12], a transcrição sistemática das leituras de campo para o banco de dados é fundamental para a correta transdução dos valores, geração de gráficos e análise do comportamento estrutural de barragens. Para garantir a rastreabilidade e a consistência histórica, o histórico de monitoramento deve registrar não apenas as medições, mas também todas as observações de campo e intervenções de manutenção que possam influenciar o comportamento dos instrumentos. A utilização de softwares específicos para o registro de dados e confecção de gráficos pode simplificar bastante a análise dos dados das leituras.

Sempre que forem identificadas leituras inconsistentes, tendências desfavoráveis ou superação dos níveis de controle, deve ser iniciado fluxo formal de comunicação e avaliação técnica. Esse processo deve contemplar o registro da ocorrência, a identificação dos instrumentos envolvidos, a análise preliminar das possíveis causas, a avaliação da persistência da anomalia e a definição das ações necessárias. Em situações mais críticas, podem ser necessárias intensificação das leituras, inspeções extraordinárias, investigações complementares e acionamento de equipes especializadas.

A definição da criticidade de anomalias registradas deve considerar fatores como magnitude e persistência das alterações observadas, relevância do instrumento no contexto da segurança da estrutura, correlação com outros instrumentos e relação com possíveis modos de falha. De forma geral, recomenda-se a adoção de níveis graduais de resposta operacional, incluindo condições de atenção, alerta e emergência, sendo cada uma associada a procedimentos específicos de atuação.

As ações corretivas associadas às anomalias identificadas podem envolver, também, a manutenção ou substituição de instrumentos, recalibração de equipamentos, atualização cadastral ou intervenções de manutenção e recuperação das estruturas. Todas as ações adotadas devem ser devidamente documentadas, incluindo justificativas técnicas, responsáveis envolvidos, cronogramas e resultados obtidos.

Além disso, a gestão eficiente da instrumentação exige atualização contínua das bases cadastrais, dos procedimentos de leitura e análise, dos limites de controle e das metodologias utilizadas. Conforme destacado em [4], os programas de monitoramento devem ser entendidos como sistemas dinâmicos, sujeitos a revisões e aperfeiçoamentos contínuos ao longo da vida útil da barragem. Dessa forma, a atualização permanente das informações e dos procedimentos contribui significativamente para o aumento da confiabilidade das análises e para o fortalecimento da gestão da segurança das estruturas.

Desse modo, a seleção da plataforma de gestão e armazenamento de dados deve ser criteriosamente definida, tendo como base a complexidade e o volume de informações existentes. Sistemas automatizados para gestão de segurança de barragens, como o SYSDAM [14], permitem centralizar informações relacionadas à instrumentação, inspeções, planos de ação, gestão de documentos, análises de risco, bem como possibilitam o processamento automático dos dados obtidos em campo, onde, no caso dos dados da instrumentação, realizam a transdução das leituras de campo, promovendo maior rastreabilidade, menor probabilidade de erros associados aos cálculos das medições, integração dos dados e suporte às avaliações técnicas. Ferramentas dessa natureza possibilitam a consolidação das leituras em um banco de dados estruturado, geração de gráficos e relatórios, controle de alterações nos dados de cadastro dos instrumentos e acompanhamento contínuo do comportamento das estruturas.

A Figura 4 apresenta um fluxograma simplificado dos principais problemas, impactos e ações relacionadas ao monitoramento de barragens por meio da instrumentação.



Figura *4* – Fluxograma simplificado dos principais problemas, impactos e ações relacionadas ao monitoramento de barragens por meio da instrumentação.

Fonte: elaborado pelos autores.

7. CONCLUSÃO

O monitoramento de barragens por meio da instrumentação é uma atividade indispensável para avaliação contínua do comportamento das estruturas e para a gestão da segurança ao longo de sua vida útil. Entretanto, conforme discutido neste trabalho, a confiabilidade das análises realizadas depende não apenas da existência de instrumentos instalados, mas também da adequada gestão das informações, da disponibilidade de documentação técnica, da correta execução das leituras, da definição de critérios de interpretação e da capacitação das equipes envolvidas nas atividades de monitoramento.

Os problemas abordados, tais como ausência de cadastro e inventário da instrumentação, inexistência de desenhos de projeto e memoriais descritivos, instrumentos danificados ou sem leituras adequadas, falhas nos procedimentos operacionais, ausência de limites de controle e deficiência na gestão dos dados, têm sido observados com relativa frequência nas usinas hidrelétricas, especialmente em empreendimentos mais antigos, comprometendo a obtenção e a interpretação confiável dos dados do monitoramento por meio da instrumentação.

Além disso, verificou-se que a análise adequada dos dados da instrumentação deve ser conduzida de forma integrada às inspeções visuais, às condições operacionais do empreendimento e às informações geotécnicas, hidráulicas, estruturais e ambientais, permitindo distinguir alterações reais no comportamento das estruturas de problemas relacionados aos próprios instrumentos, aos equipamentos de medição ou aos procedimentos de monitoramento.

Nesse âmbito, destaca-se a importância da sistematização de gestão dos dados da instrumentação, envolvendo cadastro atualizado dos instrumentos, rastreabilidade das leituras, definição de limites de referência e controle, padronização dos procedimentos de campo, capacitação contínua das equipes e utilização de ferramentas para gestão, armazenamento e análise dos dados.

Ressalta-se, ainda, que a simples obtenção de grandes volumes de dados não garante, por si só, a segurança das estruturas. A efetividade do monitoramento depende da capacidade de interpretar criticamente as informações obtidas, identificar tendências e comportamentos anômalos, além de adotar medidas preventivas e corretivas em tempo hábil, compatível com os riscos envolvidos.

Dessa forma, conclui-se que o aprimoramento contínuo das práticas relacionadas à obtenção, gestão e interpretação dos dados de instrumentação representa uma importante contribuição para o fortalecimento da segurança de barragens, favorecendo avaliações mais confiáveis do comportamento das estruturas e permitindo respostas mais ágeis e tecnicamente fundamentadas diante de situações potencialmente críticas.

8. PALAVRAS-CHAVE

instrumentação; limites de controle; segurança

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FEMA, 2025. *Glossary of Terms for Dam Safety*. Disponível em https://www.fema.gov/grants/mitigation/learn/dam-safety/federal-guidelines/glossary?combine=failure, acesso em 23/05/2026.

[2] SILVEIRA, João Francisco Alves (2006). *Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento*. São Paulo: Oficina de Textos.

[3] ADAMO, N.; AL-ANSARI, N.; SISSAKIAN, V.; LAUE, J.; KNUTSSON, S (2020). *Dam Safety: Use of Instrumentation in Dams*. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 145-202. ISSN 1792-9040. Disponível em: https://doi.org/10.47260/jesge/1115. Acesso em: 9 set. 2025.

[4] 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, DF.

[5] FUSARO, Teresa Cristina (2007). Estabelecimento de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau. 2007. 396f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, MG.

[6] ICOLD – International Commission on Large Dams. (2018). Dam surveillance guide: Guide de la surveillance des barrages (Bulletin 158). Paris: ICOLD.

[7] USACE (2014). Safety of Dams – Policy and Procedures. In: USACE. *Safety of Dams – Policy and Procedures*. Washington, DC: USACE.

[8] CHAVAN, A. R.; VALUNJKAR, S. S (2015). *A Study of Instruments used for Dam Instrumentation in Gravity and Earthen Dams*. International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR), [S. l.], v. 3, n. 5, maio. ISSN 2321-0869.

[9] BASTOS, Wellerson da Silva (2024). Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados universal para o monitoramento de barragens, com teste de equalização em piezômetros, utilizando internet das coisas. 2024. 196f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, MG.

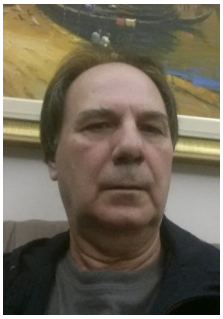
[10] USACE (2004). EM 1110-2-2300 - Appendix E - Process for Establishing Performance Parameters. www.usace.army.mil/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-2300/toc.htm , 12p.

[11] ICOLD (2000). Automated Dam Monitoring Systems, Bulletin 118: 51-59.

[12] FUSARO, Teresa Cristina; FURTADO, André Santos de Oliveira; OLIVEIRA, Victor Romeu Fernandes, SILVA, Isabelle Tanne Couto e, (2025). *Estruturação do manual de monitoramento como ferramenta para segurança de barragens*. Revista Brasileira de Engenharia de Barragens, Rio de Janeiro, ano IV, n. 5, p. [15-21].

[13] VASCONCELLOS FILHO, Túlio Marcos de; RACHID, Marina Alves; MARTINS, Marcela Nogueira Cesar; NUNES, Eric Silveira; FUSARO, Teresa Cristina. *Discussão sobre valores de controle para a instrumentação de barragens*. Seminário Nacional de Grandes Barragens, 34., 2023, Foz do Iguaçu. Anais do XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens, 2023.

[14] PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA. SYSDAM: sistema de gestão e segurança de barragens. Nova Lima, 2014. Disponível em: https://sysdam.com.br/. Acesso em: 11 jul. 2026.

	**Marina Martins FERREIRA** Engenheira Civil pela UFMG. Atua há 5 anos na área de engenharia geotécnica, com enfoque em monitoramento de barragens de hidrelétricas. Desenvolve atividades práticas voltadas à segurança e desempenho de estruturas geotécnicas e de concreto.
	**Marcos de Ávila PIMENTA FILHO** Engenheiro civil e mestre em Geotecnia, ambos pela UFMG, com 20 anos de experiência no desenvolvimento de trabalhos de consultoria e projetos de barragens, incluindo estruturas para geração de energia, armazenamento de água, rejeitos de mineração e resíduos industriais. Publicações diversas em eventos nacionais e internacionais. Coautor do livro “Barragens de Rejeitos no Brasil.
	**Marcos de Ávila PIMENTA** Engenheiro civil consultor em barragens, concretos, instrumentação, controle da construção, durabilidade do concreto, métodos construtivos, tratamentos de maciços rochosos, segurança de barragens, PSB, PAE. Mais de 40 trabalhos técnicos publicados no Brasil e no exterior (EUA, Europa e Oriente Médio). Coautor do livro “Concretos: Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo”.
	**Sebastião Antônio SILVA** Engenheiro Civil - Escola de Engenharia de São Carlos (USP-1976), 49 anos de experiência em projetos geotécnicos de barragens de hidrelétricas, abastecimento de água e mineração; instrumentação e segurança de barragens; metrô, oleodutos e gasodutos, fundações de projetos industriais e análise de riscos de estruturas geotécnicas (HIRA - Hazard Identification and Risk Assessment). Desde março de 2016, sócio proprietário da Engeboard – Projetos e Consultoria Ltda.



Wellerson Silva BASTOS

Engenheiro civil (PUC Minas), mestre em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual (UFMG). Atuação desde 2017 em projetos e consultoria para barragens de geração de energia e armazenamento hídrico, com ênfase em automatização de instrumentação, monitoramento, análise de dados e gestão de risco de estruturas. Algumas publicações em eventos nacionais e internacionais.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

REDUÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO POR MEIO DE INTERVENÇÃO NA DRENAGEM INTERNA EM UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA (PCH) NO MATO GROSSO

Camila XAVIER DO COUTO
Engenheira Civil - Elera Renováveis

Ana Paula ANTUNES DE LIMA
Gerente de Engenharia - Elera Renováveis

Guilherme ABREU ROCHA DE SOUZA
Coordenador Segurança de Barragens e Engenharia Civl - Elera Renováveis

Maria Luiza FAVARÃO VIEIRA
Engenheira Civil - Elera Renováveis

Gustavo RIBEIRO LOPES

Engenheiro Civil - Elera Renováveis

RESUMO

Este trabalho apresenta o diagnóstico e a mitigação da elevação do nível freático identificada por meio da auscultação geotécnica de uma barragem de terra associada a uma Pequena Central Hidrelétrica no estado do Mato Grosso. O objetivo foi avaliar as causas do comportamento hidráulico observado e a eficácia de medidas para rebaixamento controlado da freática, com impacto direto na estabilidade da estrutura.As análises de instrumentação indicaram poropressões superiores às previstas em projeto em instrumentos a jusante, sugerindo nível freático elevado. Foram avaliadas hipóteses relacionadas à colmatação de filtros, subdimensionamento do sistema de drenagem e obstrução das saídas de percolação.A intervenção consistiu na implantação de poços drenantes a jusante, equipados com pré-filtros e preenchimento granular adequado, permitindo o alívio seguro das poropressões. Ensaios de rebaixamento evidenciaram interação hidráulica entre os poços, com destaque para um poço com influência predominante na redução do nível freático.A integração dos dados de instrumentação com retroanálises de fluxo permitiu calibrar o modelo hidráulico e avaliar a eficiência da solução. Os resultados pós-intervenção indicaram estabilização do nível freático, redução das poropressões e aumento dos fatores de segurança, confirmando a efetividade da solução e sua contribuição para a segurança da barragem.

ABSTRACT

This study presents the diagnosis and mitigation of groundwater level rise identified through geotechnical monitoring of an earth dam associated with a Small Hydropower Plant in Mato Grosso State. The objective was to evaluate the causes of the observed hydraulic behavior and the effectiveness of measures adopted for controlled groundwater lowering, with direct implications for structural stability.Instrumentation data indicated pore pressures higher than those predicted in the design in downstream instruments, suggesting an elevated groundwater level. Hypotheses related to filter clogging, underdesign of the drainage system, and obstruction of seepage outlets were evaluated.The intervention consisted of installing drainage wells downstream, equipped with pre-filters and appropriate granular backfill, allowing safe dissipation of pore pressures. Pumping tests demonstrated hydraulic interaction among the wells, highlighting one well with predominant influence on reducing the groundwater level.The integration of instrumentation data with back-analysis of seepage allowed calibration of the hydraulic model and assessment of the solution's effectiveness.Post-intervention results indicated stabilization of the groundwater level, reduction of pore pressures, and an increase in safety factors, confirming the effectiveness of the adopted solution and its contribution to dam safety.

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens de terra está diretamente relacionada ao controle adequado do regime de percolação e das poropressões no interior do maciço, uma vez que a elevação do nível freático pode resultar na redução dos fatores de segurança dos taludes e no comprometimento do desempenho estrutural da obra ao longo do tempo. Nesse contexto, a instrumentação geotécnica desempenha papel fundamental no acompanhamento do comportamento hidráulico da barragem em operação, permitindo a identificação de condições anômalas e subsidiando a definição de medidas corretivas quando necessárias.

A estrutura analisada é constituída por uma barragem de terra instrumentada, cuja instrumentação foi ampliada ao longo dos últimos anos em função da identificação da necessidade de um monitoramento mais completo. A partir dessa ampliação, passaram a ser monitorados de forma mais detalhada os níveis piezométricos e o comportamento do lençol freático em diferentes seções da barragem, com destaque para uma seção específica (Seção D), localizada na porção jusante da estrutura e próxima à subestação, onde foram observadas leituras de poropressão superiores às previstas em projeto. Tal comportamento passou a demandar atenção quanto às condições de segurança da seção, especialmente em relação à eficiência do sistema de drenagem interna originalmente implantado.

Foram investigadas hipóteses associadas a possíveis deficiências do sistema de drenagem interna da barragem, incluindo: (i) a colmatação do filtro interno do maciço, (ii) o eventual subdimensionamento dos dispositivos de drenagem, e (iii) a colmatação da saída do fluxo de percolação do sistema de drenagem projetado na lateral do canal de fuga da casa de força, condições que poderiam estar contribuindo para a manutenção de níveis elevados de poropressão no interior do maciço. A realização de serviços pontuais de manutenção nos drenos existentes não se mostrou suficiente para promover o rebaixamento desejado do nível freático, o que motivou uma análise aprofundada da necessidade de uma intervenção complementar.

Diante desse cenário, foi concebido um estudo com o objetivo de avaliar e implementar uma solução de drenagem capaz de promover o rebaixamento controlado do nível freático na seção D da barragem. O presente trabalho descreve as intervenções executadas, baseadas na implantação de poços drenantes, e analisa a resposta do maciço por meio das leituras da instrumentação geotécnica, bem como por meio de análises de percolação e estabilidade.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Seção Analisada

A seção D, localizada na Barragem de Terra da Margem Esquerda, é instrumentada conforme apresentado na Figura 1. A seção foi analisada conforme geometria externa do levantamento topográfico realizado e zoneamento interno da barragem de acordo com o projeto executivo. Desta maneira, gerou-se a seção geotécnica para a análise no programa de elementos finitos.

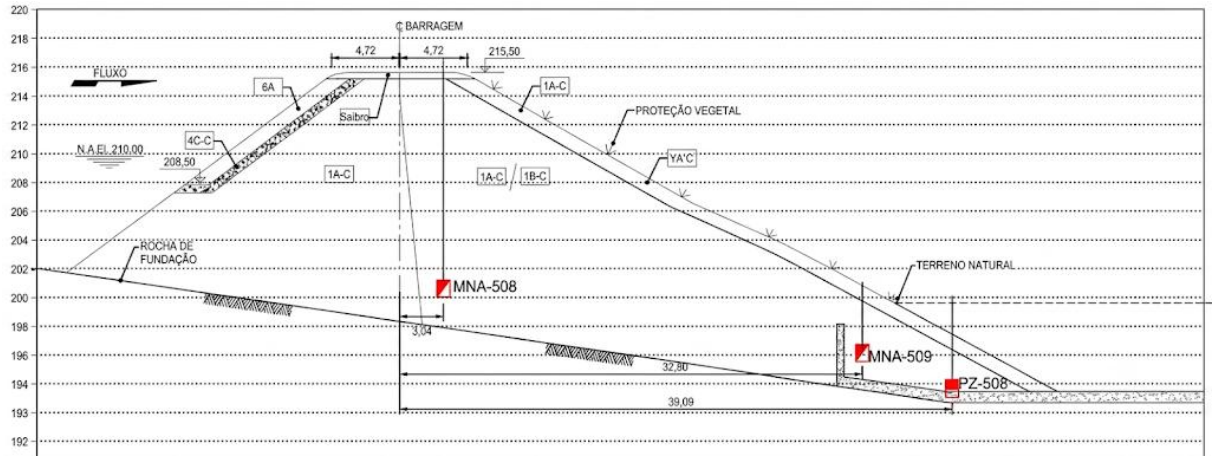


Figura 1 - Seção instrumentada D.

2.2 Descrição da Intervenção

Diante da situação, foi necessário avaliar uma forma de reduzir o nível freático no aterro da barragem, em especial a poropressão lida no instrumento PZ-508, localizado a jusante da seção D da margem esquerda.

De acordo com o projeto de drenagem, o fluxo de percolação foi projetado para sair através de sete tubos de 75 mm instalados na lateral do canal de fuga da casa de força, conforme evidenciado na Figura 2.

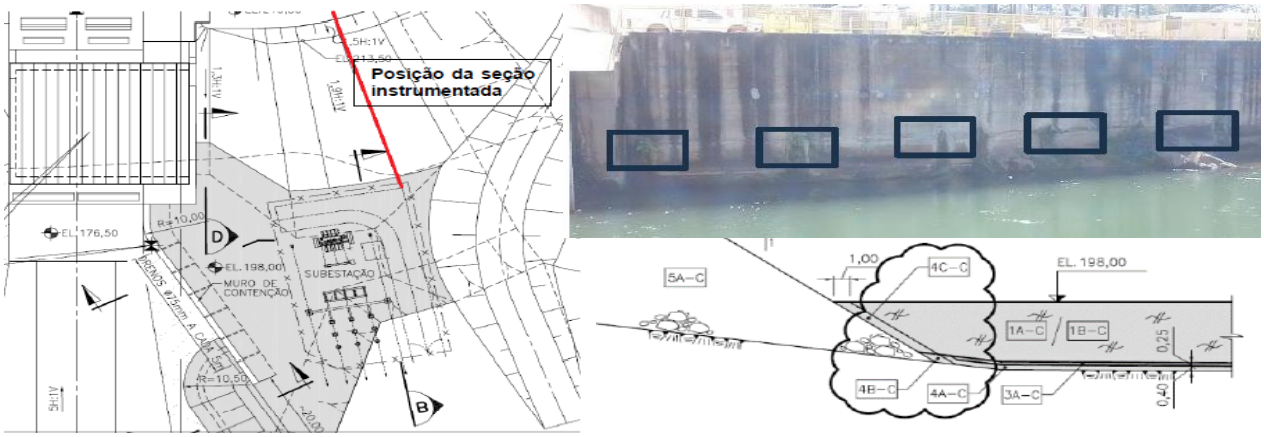


Figura 2 - Projeto de drenagem interna com detalhe da saída no canal de fuga.

Inicialmente, foi realizada uma intervenção de limpeza no sistema de drenagem existente, com o objetivo de restabelecer a eficiência do escoamento e melhorar as condições de percolação na região. Contudo, a ação não resultou em alterações significativas nas leituras dos instrumentos nem apresentou evidências visuais de incremento na vazão drenada.

Diante desse cenário, optou-se pela execução de poços de alívio, equipados com tubulações dotadas de pré-filtro, visando promover o rebaixamento do nível freático e reduzir as poropressões no maciço. As tubulações instaladas possuem aberturas de 1 mm e foram envolvidas por material filtrante constituído por areia média, com a finalidade de impedir o carreamento de partículas finas, especialmente materiais

argilosos, assegurando a estabilidade interna do sistema de drenagem e a durabilidade da solução adotada.

Para viabilizar o rebaixamento do nível d'água no poço, inicialmente foi considerada a utilização de bombeamento. No entanto, em função da diferença de cota existente em direção ao canal de fuga, adotou-se uma solução por sifonamento, permitindo o escoamento por gravidade. A vazão do sistema é monitorada em conjunto com o nível piezométrico do poço, possibilitando a avaliação contínua da eficiência do processo de drenagem.

As imagens a seguir apresentam os registros da instalação dos poços, em julho de 2024, bem como registros atuais dos poços.

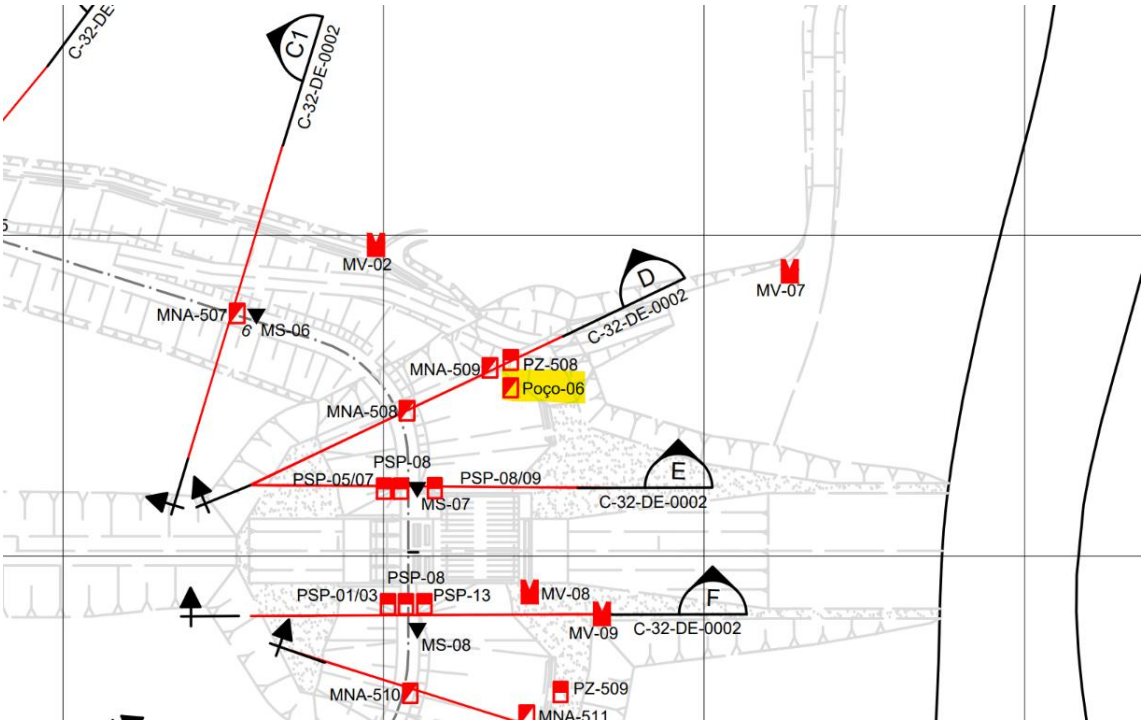


Figura 3 – Localização, em planta, do poço-06 na Seção D.



Figura 4 – Perfuração dos poços.



Figura 5 – Processo de execução do poço com tubulação instalada.



Figura 6 – Poço-06 operando.

2.3 Análises de Estabilidade e Percolação

2.3.1 Análise de Percolação

Os valores de poropressão empregados nas análises de estabilidade dos taludes foram obtidos através de análises de percolação (redes de fluxo), para os casos de carregamento de regime permanente com Nível Max. Normal fazendo uma retro análise de fluxo com os níveis piezométricos registrados pela instrumentação. Para tal, foi necessário adequar a condição de drenagem interna da barragem de maneira restringir a saída de água até atingir o nível piezométrico registrado.

Para adequar a drenagem foi utilizada a condição de contorno de *Potencial Seepage Face review*, que quando ocorre a saturação do material naquele determinado ponto a condição permite o fluxo de água por ele. Normalmente nas análises se considera que todo o dreno apresenta esta condição, porém os resultados da piezometria de campo e a forma como a drenagem foi construída, em especial da seção D, sugerem que esta condição não é verdadeira. Desta forma a condição de drenagem foi aplicada em uma pequena parcela do final do dreno horizontal e, além disso, foi necessário

diminuir a permeabilidade da areia, assim gerando poropressões compatíveis com a de campo.

Após a definição da condição da drenagem que gera um nível piezométrico compatível com a instrumentação, utilizou-se a mesma condição de drenagem para um nível do reservatório Max. Maximorum, a partir de simulações efetuadas utilizando-se o programa de computador Geostudio 2016. O nível Max. Maximorum utilizado é compatível com a cheia decamilenar calculada no projeto básico da estrutura.

2.3.2 Análise de Estabilidade

Para as análises de estabilidade quanto ao escorregamento dos taludes foi aplicado o método de equilíbrio limite também utilizando o programa computacional Geostudio 2016.

Para o tipo de análise foi utilizado o método de Spencer e para a definição da superfície crítica foi utilizada a opção entrada/saída, com a entrada posicionada na região do talude de montante passando pela crista até o talude de jusante e saída posicionada no talude de jusante continuando até toda a extensão do pé do talude de jusante.

A opção de otimização da superfície crítica foi utilizada de maneira que a superfície não necessariamente fosse um círculo de raio perfeito e como a rocha foi utilizada como impenetrável, podem ocorrer superfícies críticas compostas.

Não foi avaliada nenhuma superfície crítica específica pois não tínhamos nenhum indício de uma condição geológica que proporcionasse um menor fator de segurança em determinado alinhamento.

Para a avaliação da estabilidade dos taludes das barragens de terra e de terra-enrocamento foram analisados dois casos de carregamento, descritos abaixo:

- CCN = Nível reservatório Normal (210,40 m) com as poropressões geradas pela análise de fluxo através da retro análise com a instrumentação.
- CCE sem Sismo= Nivel do reservatório Max Maximorum (214,00 m) com as poropressões geradas pela análise de fluxo através da retroanálise com a instrumentação.
- CCL com Sismo= Sismo de Projeto e Nível do Reservatório Max Maximorum (214,00) com as poropressões geradas pela análise de fluxo através da retroanálise com a instrumentação.
- O caso de carregamento de fluxo permanente combinado com o sismo de projeto de a=0,05*g, onde “g” é a aceleração da gravidade e “a” é o coeficiente de aceleração horizontal para análise de estabilidade pseudo-estática.
- Rebaixamento Rápido do Reservatório, considerando o rebaixamento do NA instantaneamente.

A PCH em estudo é uma barragem que opera à fio d’agua e a hipótese de rebaixamento rápido não é usual, porém para verificar todos os cenários possíveis foi efetuada a análise com o rebaixamento instantâneo para a cota 208,00, ou seja, 2 metros de rebaixamento de forma instantânea.

Na Tabela 1, apresentam-se os critérios de aceitação para a estabilidade dos taludes das barragens de terra e de terra-enrocamento, com seus respectivos coeficientes de segurança, de acordo com as recomendações apresentadas pela Eletrobras (2003).

Tabela 1 - Critérios de Aceitação.

CASO DE CARREGAMENTO	NÍVEL DE ÁGUA DE MONTANTE	NÍVEL DE ÁGUA DE JUSANTE	FATOR DE SEGURANÇA MÍNIMO EXIGIDO
CCN	210,40	*	1,50
CCE sem Sismo	214,00	*	1,3
CCL com Sismo	214,00	*	1,1
Rebaixamento Rápido**	210,40	*	1,1

* considerada a condição de contorno de interação da poro-pressão para equilíbrio da rede de fluxo

** rebaixamento até a cota 208,00 m instantaneamente.

2.3.3 Parâmetros Geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos foram adotados segundo as análises de estabilidade apresentadas no projeto executivo. A Tabela 2 apresenta os valores adotados para os materiais da seção D, ilustrados na Figura 7. Para a camada mais permeável, verificada em campo, adotou-se permeabilidade cinco vezes superior à permeabilidade do terreno natural, porém mantendo as demais características de resistência. Esta camada não estava presente em toda a fundação da barragem e por isso foi considerada apenas onde a sondagem demonstrou tal comportamento.

Tabela 2 - Parâmetros Geotécnicos adotados.

MATERIAL	c' (tf/m²)	Φ (°)	γ (tf/m³)	K_h (cm/s)	K_v (cm/s)
Solo compactado (1A-C)	0,5	30	1,95	1.10^{-6}	1.10^{-7}
Solo compactado (1A-C/1B-C)	1,0	28	1,95	5.10^{-5}	5.10^{-6}
Areia (3A-C)	0,0	34	2,00	1.10^{-2}	1.10^{-2}
Transição (4C-C)	0,0	34	2,00	1.10^{-3}	1.10^{-3}
Rip-rap (6A)	0,0	45	2,10	1.10^{-3}	1.10^{-3}
Solo Coluvionar	0,5	28	1,80	5.10^{-5}	5.10^{-5}
Rocha de fundação (Impenetrável)	-	-	2,3	1.10^{-5}	1.10^{-5}
Camada permeável	0,5	28	1,80	$2,5.10^{-4}$	$2,5.10^{-4}$

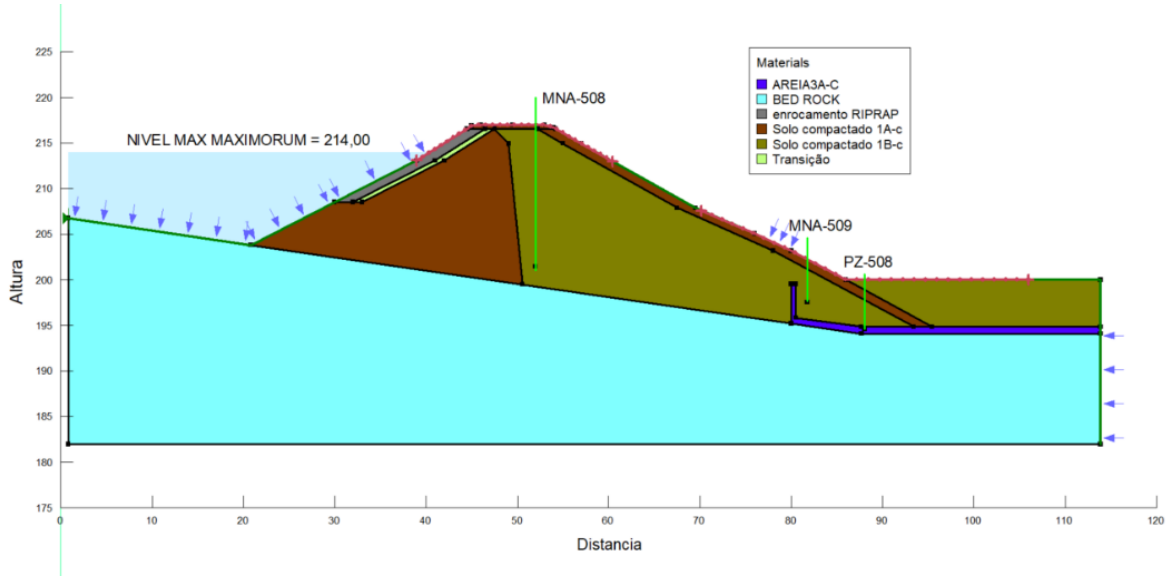


Figura 7 - Modelo geológico e materiais da Seção D.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 8 apresenta as leituras dos instrumentos na seção D, nas quais se evidencia a tendência de redução das cotas piezométricas dos instrumentos de jusante posterior à execução dos poços de drenagem (julho de 2024), em contraste com a estabilidade observada no instrumento MNA-508. Essas representações gráficas constituem a base para a calibração do modelo numérico e para a avaliação comparativa das condições de estabilidade antes e após a intervenção.

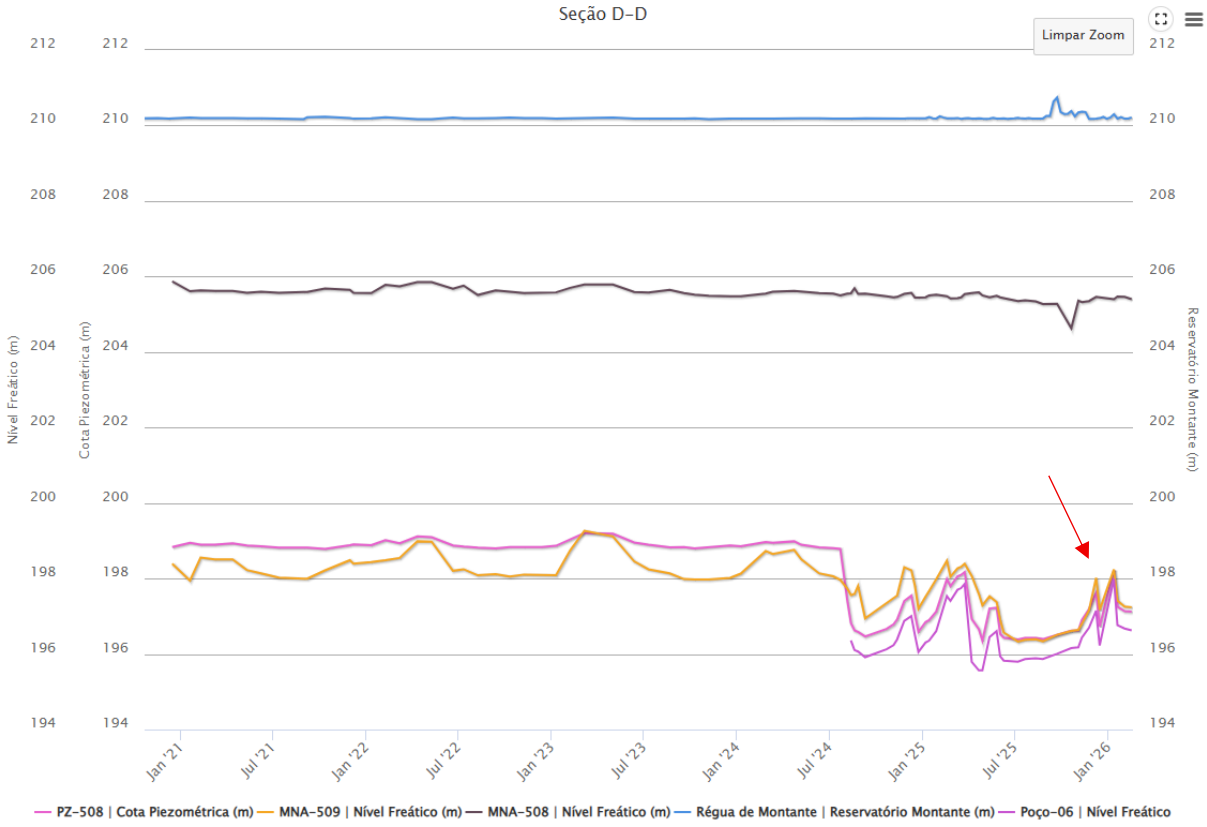


Figura 8 – Gráfico da Seção D com detalhe para o rebaixamento da freática dos instrumentos de jusante (PZ-508 e MNA-509).

Além disso, observa-se, através do gráfico, que no período de dez/24, ocorreu um novo aumento das leituras dos instrumentos, rapidamente identificado pelo estrangulamento da mangueira responsável por realizar a drenagem do poço. Após a substituição da mesma, os registros voltaram a reduzir.

Observou-se, também, que a freática na seção responde diretamente aos comportamentos sazonais, com aumento natural durante períodos chuvosos. Com o objetivo de contornar a situação, foi instalada uma segunda mangueira no sexto poço para aumentar a drenagem da região. Nesse sentido, os instrumentos retornaram à condição normal, abaixo dos limites de controle estabelecidos, indicando redução e controle da freática.

A partir das leituras instrumentais e da interpretação do comportamento hidráulico do maciço, procedeu-se à calibração do modelo de fluxo, cujo resultado está apresentado na Figura 9. Nessa figura, a linha contínua representa as poropressões medidas nos instrumentos, enquanto a linha tracejada indica o nível freático obtido na simulação numérica.

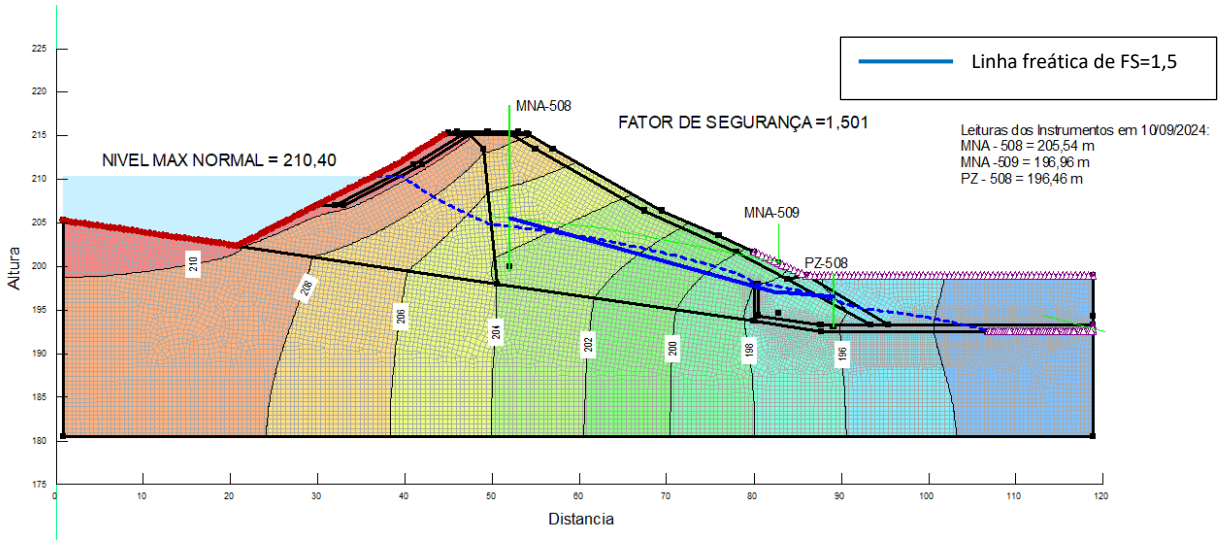


Figura 9 – CCN - Análise de fluxo com as poropressões lidas pelos instrumentos, destaque para linha tracejada e contínua.

Observa-se que, após os ajustes realizados, houve uma boa concordância entre os valores medidos em campo e os resultados do modelo, evidenciando a aderência da solução numérica às condições reais do maciço. Para alcançar essa representatividade, foi necessário ajustar a condição de contorno de fluxo a jusante, bem como o parâmetro de permeabilidade do material filtrante, de modo a reproduzir adequadamente o regime de percolação indicado pela instrumentação. Uma vez calibrado, o modelo passou a representar de forma consistente o comportamento hidráulico da seção, sendo os parâmetros obtidos mantidos para as análises subsequentes de estabilidade.

Com base nessa modelagem, foram conduzidas as análises de estabilidade para a Seção D da margem esquerda, considerando os diferentes casos de carregamento. Os fatores de segurança obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Fatores de Segurança na Seção D para as condições de carregamento.

Seção Analisada	**Fatores de Segurança**			
	CCN	**CCE**	**CCL**	**Rebaixamento Rápido**
Seção D – ME*	1,547	1,382	1,227	1,159

**Os resultados anteriores a intervenção realizada na Seção D – ME* são 1,410; 1,25; 1,14 e 1,15, respectivamente.*

A comparação entre os fatores de segurança evidencia um incremento na estabilidade pós-intervenção em todas as condições analisadas, com destaque para os casos de operação normal e excepcional.

Os resultados indicam que a Seção D passou a apresentar níveis de segurança superiores aos critérios mínimos recomendados para barragens de terra, refletindo diretamente a redução das poropressões no maciço após a implementação dos poços

de drenagem. Esse comportamento está em consonância com as respostas observadas nos instrumentos instalados a jusante, em especial o PZ-508 e o MNA-509, que apresentaram redução consistente das cargas hidráulicas.

Adicionalmente, a Figura 9 permite visualizar a superfície potencial de ruptura associada a um fator de segurança da ordem de 1,50 (linha em azul destacada na figura), evidenciando uma condição globalmente estável do talude. A coerência entre os resultados de fluxo e de estabilidade reforça a confiabilidade das análises realizadas, uma vez que ambas se baseiam em um modelo calibrado com dados reais de campo.

4. CONCLUSÕES

A integração entre dados de instrumentação e retroanálises constitui uma abordagem fundamental para o diagnóstico e a resolução de problemas de drenagem em barragens de terra. Esse processo iterativo possibilita a identificação de mecanismos de fluxo, zonas de maior pressão e eventuais deficiências no sistema de drenagem, subsidiando a definição de soluções mais assertivas e tecnicamente embasadas. Dessa forma, a metodologia contribui diretamente para a redução de incertezas nas análises, aumento da confiabilidade dos resultados e, consequentemente, para a tomada de decisão segura na gestão e manutenção de estruturas de barragem.

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a intervenção implementada no sistema de drenagem foi eficaz na melhoria das condições de estabilidade do maciço da barragem, em especial na Seção D da margem esquerda. A redução das poropressões, evidenciada pelas leituras dos instrumentos PZ-508 e MNA-509, bem como o rebaixamento do nível freático observado nas análises de fluxo calibradas, refletem diretamente na elevação dos fatores de segurança para todos os casos de carregamento avaliados.

Destaca-se a importância do poço-06 no controle do regime hidráulico da seção, cuja operação mostrou-se determinante para a dissipação das pressões internas e melhoria global das condições de estabilidade. A consistência entre os dados de instrumentação e os resultados dos modelos numéricos reforça a confiabilidade das análises realizadas e a adequação das premissas adotadas.

Os fatores de segurança obtidos após a intervenção atendem aos critérios recomendados para barragens de terra, indicando uma condição satisfatória de estabilidade para a seção analisada.

Ressalta-se, por fim, que a barragem, e em particular a Seção D, permanece sob monitoramento contínuo por meio do sistema de instrumentação e inspeção visual, com acompanhamento sistemático do time técnico. Esse controle permanente assegura a detecção antecipada de eventuais anomalias e contribui para a manutenção de um cenário atual de segurança estrutural adequado.

5. PALAVRAS-CHAVE

Barragens, análise de estabilidade, drenagem, instrumentação, nível freático.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (2003) – “Slope Stability”, Engineering Manual EM 1110-2-1902, Washington, DC.

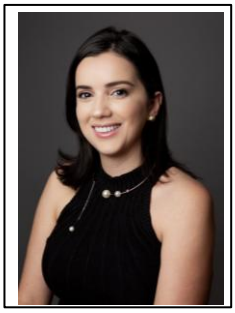
[2] UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (1987) – “Design of Small Dams”, 3ª edição, U.S. Department of the Interior, Washington, DC.

[3] ELETROBRAS (2003) – “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas”, Rio de Janeiro.

[4] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD (diversos anos) – “Bulletins on Dam Safety and Design”, Paris.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2017) – “NBR 13028: Barragens para rejeitos e resíduos industriais”, Rio de Janeiro.

	**Camila XAVIER DO COUTO** Engenheira Civil formada pela UFGD - Universidade Federal da Grande Dourados, pós-graduada pela PUC- Minas em Engenharia Geotécnica e cursando MBA em Gestão de Projetos da USP. Atuação de mais de 5 anos nas diversas áreas de segurança de barragens de terra/ enrocamento e concreto, atuando tanto no setor de mineração quanto em geração de energia. Apresenta forte atuação em gestão de riscos estratégicos e planos de ação.
	**Maria Luiza FAVARÃO VIEIRA** Engenheira civil formada pela UNESP e pós-graduada pela PUC-Minas em Geotecnia, com atuação em segurança de barragens, análises de estabilidade, monitoramento geotécnico e gestão de riscos, com experiência em elaboração de relatórios para suporte à tomada de decisão.

	**Guilherme ABREU ROCHA DE SOUZA** Engenheiro Civil formado pela UVA – Universidade de Veiga de Almeida, MBA em Gestão de Negócios no Setor de Energia e pós-graduando pela IPOS - em Geotecnia. Atuação de mais de 10 anos no setor de energia com foco em gestão de ativos de infraestrutura e segurança de barragens.
	**Ana Paula ANTUNES DE LIMA** Engenheira civil formada pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná, especialista em Segurança de Barragens pelas Faculdades IDD e MBA em Gestão de Negócios com Ênfase no Setor Elétrico pelo IBMEC. Certificada PMP®, possui mais de 12 anos de atuação no setor de energia renovável com experiência em gestão de riscos, monitoramento geotécnico, implantação de Planos de Segurança de Barragens e Planos de Ação de Emergência, além de coordenação de equipes multidisciplinares e relacionamento com órgãos reguladores e comunidades.
	**Gustavo RIBEIRO LOPES** Engenheiro Civil formado pela UVA – Universidade de Veiga de Almeida, pós-graduado pelo IDD - em Segurança de Barragens. Atuação em segurança de barragens, análises de estabilidade, monitoramento e elaboração de relatórios técnicos.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.1
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

TESTES DE RECUPERAÇÃO EM PIEZÔMETROS: EVIDÊNCIAS TÉCNICAS PARA A TOMADA DE DECISÃO NA SEGURANÇA DE BARRAGENS

Clécio BARBOSA

Engenheiro Civil - AXIA Energia Nordeste

João Francisco ALVES SILVEIRA

Engenheiro Civil - SBB Engenharia

Fabiola BARROS

Engenheira Civil - AXIA Energia Nordeste

Filipe ANDRADE

Engenheiro Civil - AXIA Energia Nordeste

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise comparativa das recomendações de Revisão Periódica de Segurança de Barragens (RPSB) relativas à realização de testes de recuperação em piezômetros nas UHEs Xingó, Boa Esperança e Sobradinho. O estudo abrange mais de 50 instrumentos instalados em estruturas de concreto, barragens de terra e diques, com séries históricas superiores a três décadas. A metodologia considerou o comportamento das subpressões, a posição dos instrumentos, as condições geológicas, a resposta hidráulica dos maciços e os riscos operacionais associados à intervenção. Os resultados indicam que muitos comportamentos classificados como anômalos são compatíveis com fundações de baixa permeabilidade, filtros drenantes, sedimentos de montante ou defasagens temporais de resposta. Conclui-se que testes de recuperação não devem ser executados de forma indiscriminada, pois podem causar colmatação, fraturamento hidráulico, alteração artificial das leituras e perda funcional dos instrumentos. Recomenda-se decisão individualizada, baseada em hipótese técnica, limites de carga, volume e pressão, monitoramento contínuo, manutenção seletiva e análise integrada entre inspeções, instrumentação e mecanismos potenciais de falha.

ABSTRACT

This paper presents a comparative assessment of Periodic Dam Safety Review recommendations regarding recovery tests in piezometers at the Xingó, Boa Esperança and Sobradinho hydropower plants. More than 50 instruments installed in concrete structures, embankment dams and dikes are considered, with monitoring records spanning over three decades. The method evaluates pore pressure and uplift trends, instrument location, geological conditions, hydraulic response and the operational risks associated with intrusive testing. The results show that several behaviors previously classified as anomalous may be compatible with low-permeability foundations, drainage filters, upstream sedimentation or hydraulic time lag. The paper concludes that piezometer recovery tests should not be performed indiscriminately because they may induce clogging, hydraulic fracturing, artificial readings and temporary or permanent loss of monitoring capability. A case-by-case approach is recommended, supported by a clear technical hypothesis, limits for applied head, volume and pressure, continuous surveillance, selective maintenance and integrated interpretation of inspection data, instrumentation records and potential failure modes.

1. INTRODUÇÃO

A instrumentação de barragens constitui um dos principais elementos de verificação do desempenho das estruturas em operação. Em barragens de terra e enrocamento, diques e estruturas de concreto, piezômetros permitem acompanhar linhas freáticas, pressões neutras, gradientes hidráulicos e tendências associadas à percolação, ao desempenho de filtros e drenos, à resposta da fundação e à eficiência de sistemas de drenagem. A utilidade desses instrumentos, porém, depende menos da quantidade instalada e mais da qualidade da interpretação técnica de seus dados.

No contexto brasileiro, a Política Nacional de Segurança de Barragens estabelece que a segurança deve ser tratada como condição voltada à manutenção da integridade estrutural e operacional, com preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente [1]. A alteração promovida pela Lei nº 14.066/2020 reforçou o caráter preventivo da gestão de segurança, ampliando obrigações de monitoramento, responsabilização e atuação sistemática dos empreendedores [2]. No plano operacional, os manuais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico orientam que a instrumentação deve ser compatível com o porte, o risco e as características da barragem, com análise periódica dos dados e definição de valores de controle [3], [4].

Portanto, em vez de recomendar indiscriminadamente testes de recuperação em piezômetros com comportamento anômalo, a medida tecnicamente mais segura é realizar previamente uma análise crítica do instrumento e de seu contexto hidrogeotécnico, podendo-se optar, conforme o caso, por inspeção visual, verificação do topo e da proteção, análise comparativa com instrumentos vizinhos, revisão do histórico de leituras, instalação de instrumento complementar ou desativação controlada do piezômetro. O próprio Manual de Políticas e Práticas de Segurança

de Barragens reconhece piezômetros entupidos ou defeituosos como anomalias relevantes de instrumentação e destaca que esses instrumentos medem pressão d'água e devem estar limpos e em boas condições físicas [3]; contudo, isso não significa que qualquer tentativa de "recuperação" seja automaticamente segura ou recomendável sem avaliação prévia. Na **Figura 1**, apresenta-se um caso de perturbação prolongada após um ensaio de infiltração em piezômetro.

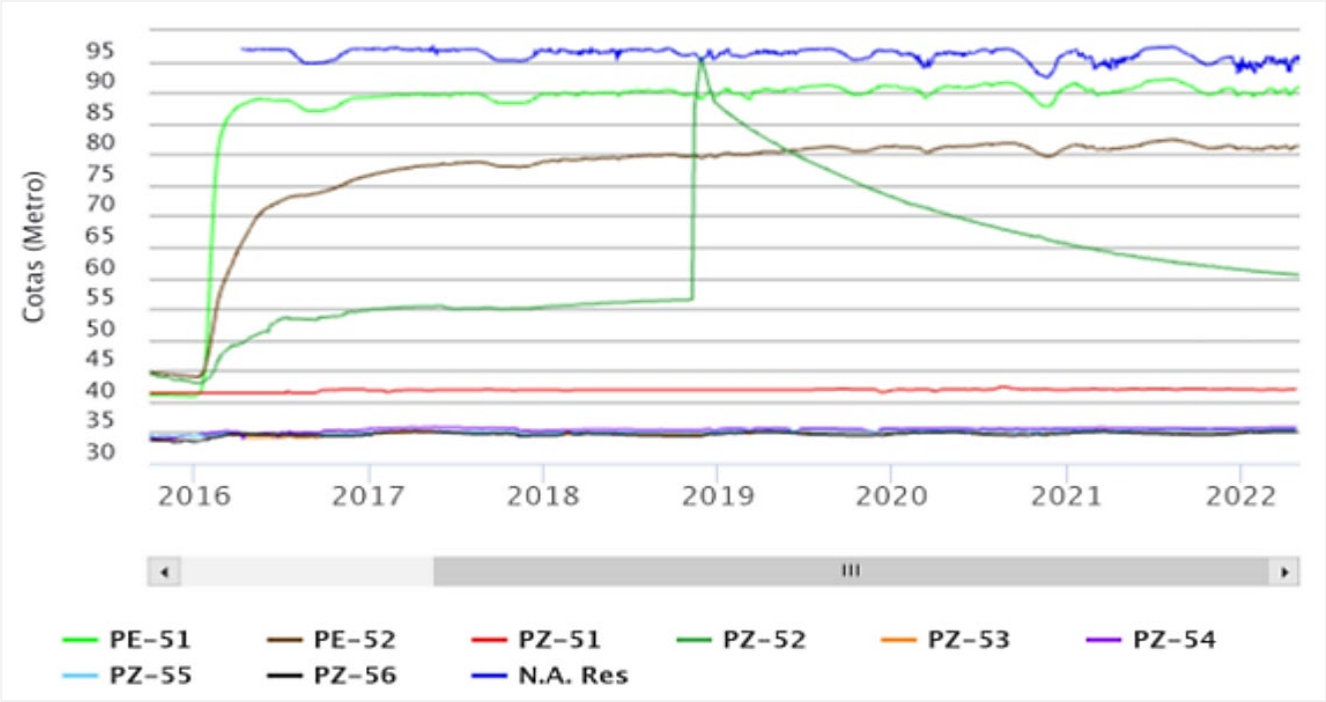


Figura 1 - Exemplo de perturbação prolongada após ensaio de infiltração em piezômetro.

Fonte: Relatório SBB Engenharia, 2025.

O problema técnico central é que o teste de recuperação não é uma leitura neutra; é uma intervenção no sistema monitorado. Em materiais de baixa permeabilidade, a recuperação pode ser muito lenta. Em núcleos argilosos ou contatos críticos, a aplicação de carga pode induzir fraturamento hidráulico. Em filtros e tapetes drenantes, a água adicionada pode dissipar rapidamente sem que isso represente falha do instrumento. Em fundações rochosas pouco fraturadas, a mesma resposta lenta que motivou a suspeita de defeito pode ser justamente a evidência de baixa condutividade hidráulica [5], [6].

Este artigo discute esse problema a partir de três estudos de caso: UHE Xingó, UHE Boa Esperança e UHE Sobradinho. Os relatórios técnicos da SBB Engenharia reexaminaram recomendações dos Relatórios das Inspeções Periódicas de Segurança de Barragens (RPSB) para testes de recuperação em piezômetros de fundação, estruturas de concreto, barragens de terra e diques [7], [8], [9]. O objetivo é propor uma análise crítica: o teste de recuperação não deve ser tratado como procedimento automático de comprovação de funcionalidade, mas como intervenção técnica com hipóteses, limites, riscos e critérios de decisão previamente definidos.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1. Instrumentação, Vigilância e Interpretação de Tendências

A literatura internacional de segurança de barragens trata a vigilância como processo integrado de inspeções visuais, monitoramento por instrumentos, análise de dados, comparação com valores de referência e tomada de decisão. O ICOLD, no Bulletin 158, descreve a vigilância como atividade voltada ao diagnóstico tempestivo do comportamento de barragens e à detecção precoce de condições indesejáveis [10]. Essa perspectiva é coerente com a literatura clássica de instrumentação geotécnica, na qual instrumentos são meios de reduzir incertezas e subsidiar decisões, e não elementos isolados de confirmação burocrática.

O USACE ressalta que programas de instrumentação devem apoiar a avaliação do desempenho de barragens e diques durante construção, primeiro enchimento, operação e eventos excepcionais [11]. O USBR, em seu Design Standards No. 13, também trata a instrumentação como parte de um programa de monitoramento que inclui projeto, leitura, validação, avaliação de dados e resposta a informações incomuns [12]. Portanto, uma leitura piezométrica não deve ser interpretada sem a seção geotécnica, o histórico do reservatório, o regime pluviométrico, os instrumentos vizinhos e os mecanismos potenciais de falha.

Em termos práticos, séries temporais de piezômetros raramente são perfeitamente lineares. Elas incorporam efeitos do reservatório, chuva, estiagem, drenagem, sedimentação, envelhecimento da estrutura, alterações de manutenção, limitações de leitura manual e resposta própria do meio. O erro metodológico ocorre quando toda ausência de resposta é classificada como falha do instrumento e toda variação fora do padrão visual é tratada como anomalia estrutural. A boa prática exige separar comportamento geotécnico plausível, falha de leitura, obstrução real e condição de segurança adversa.

2.2. Piezômetros de Tubo Aberto e Medidores de Subpressão

Piezômetros de tubo aberto são instrumentos simples e robustos, utilizados para medir a carga piezométrica em um ponto de interesse. Em barragens de terra, podem estar instalados no núcleo, na fundação, em filtros horizontais, no pé de jusante ou em áreas de dissipação. Em estruturas de concreto, piezômetros, medidores de subpressão e drenos de fundação permitem avaliar subpressões, eficiência da drenagem e gradientes hidráulicos no contato concreto-rocha. Como destaca Silveira [13], a instrumentação ocupa papel central na avaliação do comportamento de barragens, especialmente por se tratar de obras de vida longa, que exigem conservação, reavaliação periódica e interpretação contínua de desempenho.

Em filtros e tapetes drenantes, a expectativa técnica é que a água seja rapidamente conduzida para o sistema de drenagem. Assim, um piezômetro instalado no filtro pode permanecer seco por toda a vida útil da barragem sem que isso represente, necessariamente, falha instrumental ou condição adversa de segurança, desde que os instrumentos da fundação, as medições de vazão e as inspeções de jusante confirmem ausência de percolação indesejada. Já um piezômetro instalado em núcleo compactado ou em contato de fundação

demanda maior cautela, pois a imposição artificial de carga hidráulica durante procedimentos de recuperação pode alterar localmente os gradientes hidráulicos e, em situações desfavoráveis, favorecer a mobilização de partículas ou a perturbação do meio adjacente ao instrumento.

Em fundações rochosas, sobretudo em maciços granito-gnáissicos pouco fraturados, a baixa condutividade hidráulica pode produzir leituras constantes, respostas muito lentas ou mesmo ausência aparente de variação ao longo do tempo. Nesses casos, a interpretação correta deve considerar a qualidade do maciço, o espaçamento e a abertura das descontinuidades, a posição da cortina de drenagem, o histórico de subpressões após o enchimento do reservatório e eventual tendência de redução das pressões em função de processos de colmatação ou sedimentação a montante. Essa abordagem é coerente com a orientação de Silveira para que os dados de instrumentação sejam utilizados como elementos de análise do comportamento da barragem e de suas fundações, estabelecendo relação entre medições, hipóteses de projeto e evolução observada em campo [13], [14]. Desse modo, o fato de o instrumento estar aparentemente seco não é, por si só, critério suficiente para decidir pela execução de teste de recuperação do piezômetro.

2.3. Tempo de Resposta, Baixa Permeabilidade e Efeito de Defasagem

O tempo de resposta hidráulica de um piezômetro depende da condutividade do meio, do volume de água necessário para alterar o nível no tubo, da geometria do trecho filtrante e da conexão hidráulica entre o instrumento e o maciço. Em materiais muito permeáveis, a dissipação de uma pequena perturbação é rápida. Em materiais pouco permeáveis, a recuperação pode ser lenta e a leitura pode permanecer artificialmente elevada por longo período. Essa defasagem, usualmente chamada de *time lag,* é uma limitação conhecida na interpretação de piezômetros de tubo aberto [10], [11].

A consequência operacional é direta: se um teste de recuperação introduz água em um piezômetro conectado a um maciço pouco permeável, a leitura subsequente pode deixar de representar a condição real da barragem. O instrumento passa a registrar a própria perturbação causada pelo teste. Nessa situação, a tentativa de verificar funcionalidade reduz a confiabilidade da série histórica, justamente o contrário do objetivo de um programa de monitoramento.

A análise de baixa permeabilidade também explica comportamentos aparentemente contraditórios. Em algumas barragens, a resposta piezométrica pode permanecer defasada em relação ao nível do reservatório, especialmente após períodos de estiagem ou variações sazonais. Nesses casos, leituras momentaneamente acima do nível d'água de montante não deve ser automaticamente tratadas como erro; precisam ser avaliadas no contexto da cota de instalação, do histórico, da seção instrumentada e da tendência de longo prazo.

2.4. Testes de Recuperação e Analogia com Ensaios do Tipo Slug Test

Em hidrogeologia, ensaios do tipo *slug test* avaliam a resposta do nível d'água após uma alteração instantânea de carga no furo de sondagem, permitindo estimar propriedades hidráulicas próximas ao ponto ensaiado [15], [16], [19]. A lógica física é semelhante à de um teste de recuperação em piezômetro: aplica-se uma perturbação e observa-se a dissipação da carga. Porém, a finalidade e o contexto são diferentes. Em um aquífero, busca-se estimar parâmetros; em uma barragem em operação, busca-se preservar a segurança e a capacidade de monitoramento.

Essa diferença muda completamente o critério de aceitabilidade. Um *slug test* pode admitir maior liberdade experimental quando o objetivo é caracterizar o aquífero [21], [21]. Em uma barragem, especialmente com núcleo, fundação sensível ou contato concreto-rocha, a intervenção deve ser mínima, controlada e reversível. A pergunta não é apenas se o instrumento responde, mas se o benefício de provocar essa resposta supera o risco de alterar a condição monitorada.

2.5. Riscos Técnicos Associados à Execução Indiscriminada

Com base na análise bibliografia, foi possível agrupar os riscos em cinco categorias, conforme **Tabela 1** abaixo:

Tabela 1 – Categorias de riscos associados à execução de testes de recuperação de piezômetros.

CATEGORIAS	RISCOS
CATEGORIA 1: Perda temporária ou prolongada de funcionalidade.	O instrumento passa a refletir a perturbação do teste e não a subpressão real.
CATEGORIA 2: Fraturamento hidráulico.	Quando se aplica carga em núcleos argilosos, aterros, interface com barragem de concreto.
CATEGORIA 3: Colmatação.	Associada à remobilização de finos, incrustações, obstrução do trecho filtrante ou bloqueio interno da tubulação.
CATEGORIA 4: Falso Diagnóstico.	Resposta lenta é interpretada como falha instrumental quando ela é compatível com baixa condutividade.
CATEGORIA 5: Perda de continuidade da série histórica.	Prejudica a avaliação de tendências de longo prazo.

Esses riscos não significam que testes de recuperação devam ser proibidos. A conclusão correta é mais restrita: eles podem ser adequados quando tecnicamente justificados, em pontos de baixo risco e com limites operacionais claros. Em contrapartida, testes automáticos, realizados apenas porque um piezômetro está seco ou com leitura estável, podem reduzir a qualidade do monitoramento e criar problema operacional que não existia.

A abordagem mais segura é compatível com a filosofia de gestão baseada em desempenho: a decisão deve partir do mecanismo potencial de falha, do papel do instrumento nesse mecanismo e da consequência de perder sua leitura. Um piezômetro crítico, instalado em núcleo, não deve ser submetido ao mesmo procedimento de um instrumento em filtro horizontal. Um piezômetro em fundação rochosa de baixa permeabilidade não deve ser interpretado da mesma forma que um instrumento em areia ou cascalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido a partir de análise documental dos relatórios técnicos de avaliação das recomendações de RPSB elaborados pela SBB Engenharia para UHEs Xingó, Boa Esperança e Sobradinho [7], [8], [9]. Esses documentos reavaliam recomendações de testes de recuperação em piezômetros de tubo aberto e instrumentos de fundação, considerando localização, histórico de leituras, comportamento hidráulico e risco de intervenção (**Tabela 2**).

A metodologia adotada neste artigo não buscou recalcular parâmetros hidráulicos. O objetivo foi sistematizar evidências técnicas para decisão de segurança. Foram extraídos dos relatórios: número e tipo de instrumentos indicados para teste; posição do piezômetro na seção; material envolvente; comportamento histórico; justificativa da RPSB; avaliação crítica da SBB; risco associado ao teste; e recomendação final. A bibliografia foi usada para estruturar o embasamento sobre instrumentação, vigilância, *time lag, slug test* e gestão baseada em risco [10], [15], [17].

Os instrumentos foram interpretados segundo quatro classes de decisão: (i) teste não recomendado, quando o comportamento era compatível com a seção e o risco de intervenção superava o benefício; (ii) teste limitado e controlado, quando o instrumento estava em filtro ou condição de baixo risco e havia hipótese clara a verificar; (iii) manutenção seletiva ou desobstrução, quando havia suspeita operacional localizada; e (iv) substituição ou reavaliação futura, quando a recuperação não fosse tecnicamente viável ou economicamente justificável.

Tabela 2 - Síntese dos casos analisados.

CASO	INSTRUMENTOS AVALIADOS	ESTRUTURAS ENVOLVIDAS	PRINCIPAIS QUESTÕES OBSERVADAS
UHE Xingó	6 piezômetros	Tomada d'água e vertedouro em fundação rochosa	Leituras constantes, instrumentos aparentemente secos, fundação granito-gnaisse de baixa permeabilidade
UHE Boa Esperança	2 piezômetros	Trecho de barragem de terra-enrocamento e fundação do vertedouro	PZ-10 com leituras acima do NA em estiagem; PZ-11 com possível obstrução
UHE Sobradinho	41 piezômetros	Barragem de terra, diques A/B/C e estruturas de concreto	Piezômetros secos, histórico de testes anteriores, filtros horizontais, núcleos e fundações

3.1. Matriz de Decisão Proposta

Com base nos relatórios e na bibliografia, propõe-se uma matriz qualitativa de apoio à decisão (**Tabela 3**). A matriz não substitui a análise de engenharia, mas evita que a recomendação de teste seja aplicada de modo padronizado a situações geotécnicas diferentes. O eixo principal é a posição do instrumento; o segundo eixo é a consequência de intervenção; o terceiro é a hipótese que se pretende verificar.

A matriz reforça que o comportamento 'seco' precisa ser interpretado. Em filtro horizontal, pode indicar que o filtro está funcionando e que a linha freática permanece abaixo da zona drenante. Em fundação rochosa pouco permeável, pode indicar baixa condutividade e ausência de subpressão relevante. Em núcleo argiloso, por outro lado, qualquer intervenção com carga deve ser tratada com prudência, pois o núcleo é o elemento de estanqueidade da barragem.

Tabela 3 - Matriz qualitativa de decisão para testes de recuperação em piezômetros.

SITUAÇÃO OBSERVADA	INTERPRETAÇÃO POSSÍVEL	RISCO DE TESTE	CONDUTA RECOMENDADA
Piezômetro em filtro horizontal seco desde a instalação	Linha freática abaixo do filtro ou drenagem eficiente	Baixo a moderado, se volume e carga forem limitados	Teste apenas com pequeno volume e carga máxima definida, se houver hipótese técnica
Piezômetro em núcleo argiloso	Instrumento pode estar medindo pressão neutra em zona sensível	Alto risco de fraturamento hidráulico ou abertura de caminho preferencial	Evitar teste com introdução de água; priorizar leitura, inspeção e instrumentos vizinhos
Piezômetro em fundação rochosa pouco fraturada	Baixa permeabilidade e resposta muito lenta	Risco de deixar o instrumento artificialmente perturbado por longo período	Não testar salvo justificativa robusta; verificar profundidade e integridade mecânica
Leitura defasada em relação ao reservatório	*Time lag*, armazenamento ou resposta sazonal	Teste pode mascarar comportamento real	Avaliar série histórica e instrumentos correlatos antes de intervir
Suspeita localizada de obstrução	Bloqueio mecânico, incrustação ou coluna d'água acumulada	Variável conforme posição do instrumento	Desobstrução seletiva com baixa pressão; registrar limites e resposta pós-intervenção

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. UHE Xingó: Fundação Rochosa e Resposta de Longo Prazo

A UHE Xingó, com reservatório concluído em 1994, possuía cerca de 31 anos de operação em 2025. Os seis piezômetros avaliados estavam instalados na fundação das estruturas de concreto da tomada d'água e do vertedouro, em maciço granito-gnáissico de boa qualidade, pouco fraturado e de baixa permeabilidade.

Nessas condições, a introdução de água poderia gerar resposta muito lenta e manter os instrumentos artificialmente perturbados por longo período. O PZ-103 exemplifica essa situação: após registrar leituras máximas no enchimento e posterior redução gradual até estabilização, a condição seca foi interpretada como compatível com o comportamento hidráulico local, e não como evidência suficiente para teste de recuperação (**Figura 2**).

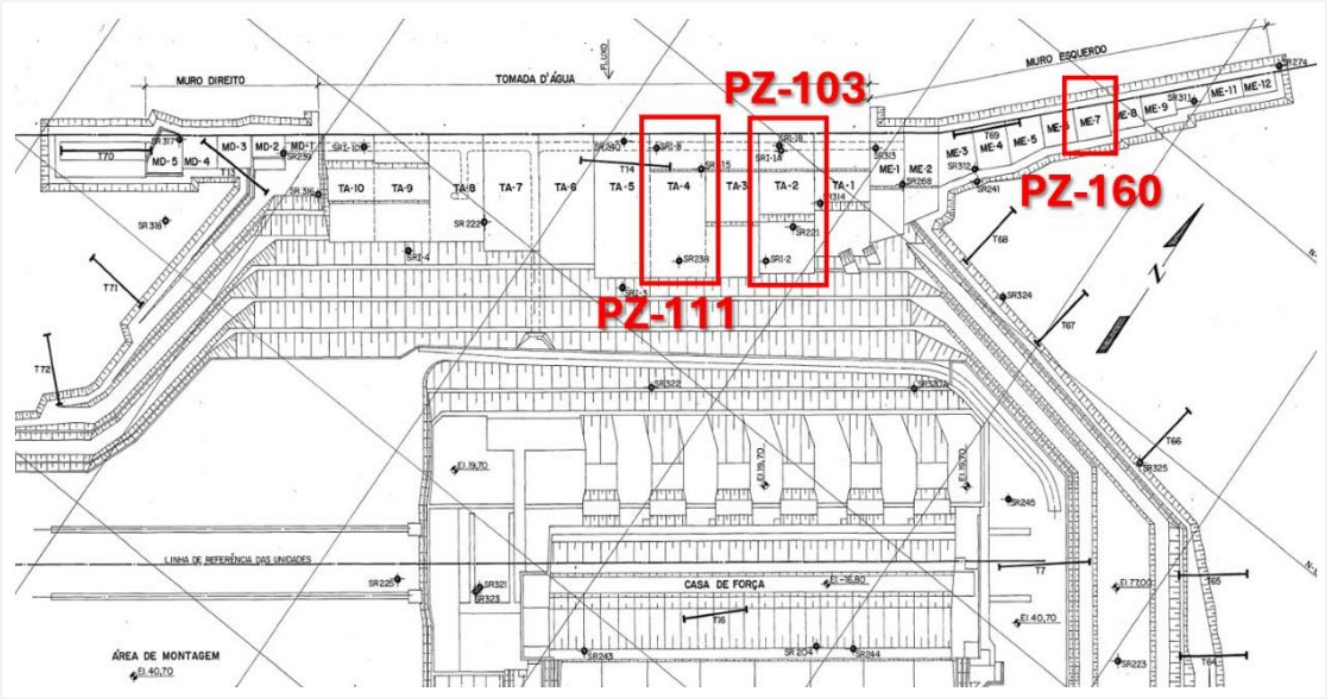


Figura 2 - Locação dos piezômetros PZ-111, PZ-103 e PZ-160 na tomada d'água.

Fonte: AXIA Energia Nordeste, 2026.

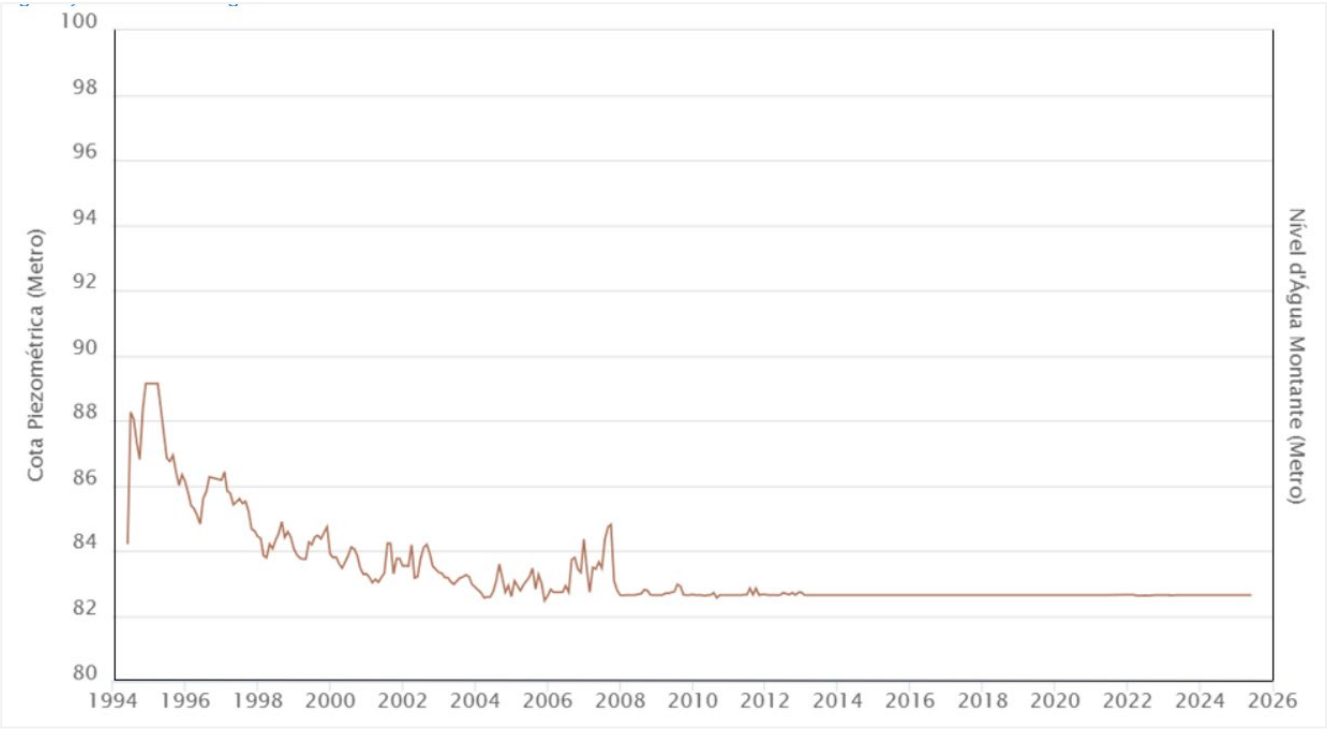


Figura 3 – Gráfico de acompanhamento das subpressões do PZ 103.

Fonte: AXIA Energia Nordeste, 2026.

Raciocínio semelhante foi aplicado aos PZ-111 e PZ-160, sendo que, para este último, recomendou-se apenas a verificação de profundidade, sem intervenção hidráulica. Nos piezômetros do vertedouro, como PZ-306, PZ-316 e PZ-321, a análise do histórico, da tendência de estabilização ou redução de subpressões e da ausência de indícios críticos também levou à conclusão de que testes de recuperação poderiam causar perturbação desnecessária ao sistema de monitoramento.

A análise dos piezômetros de Xingó indica que a decisão sobre testes de recuperação deve ser condicionada à geologia da fundação e ao histórico de comportamento dos instrumentos. Em fundações rochosas pouco fraturadas e de baixa permeabilidade, leituras estáveis, reduzidas ou aparentemente secas podem refletir a própria condição hidráulica do maciço, e não necessariamente obstrução ou falha instrumental. Nesse contexto, a introdução de água pode produzir recuperação lenta, alterar artificialmente a série histórica e gerar falso diagnóstico. Por isso, os instrumentos foram enquadrados na matriz de decisão conforme o risco predominante e a conduta técnica mais proporcional, conforme apresentado na **Tabela 4**.

Tabela 4 - Enquadramento dos piezômetros da UHE Xingó na matriz de decisão para testes de recuperação.

INST.	ENQUADRAMENTO NA MATRIZ DE DECISÃO	CATEGORIA DE RISCO PREDOMINANTE	CLASSE DE DECISÃO	CONDUTA OBSERVADA
PZ-103	Piezômetro em fundação rochosa pouco fraturada, com baixa permeabilidade e resposta hidráulica lenta.	**Categoria 4** – Falso diagnóstico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(I)** Teste não recomendado.	Não testar, salvo justificativa robusta. Priorizar análise da série histórica, verificação de profundidade e integridade mecânica.
PZ-111	Piezômetro em fundação rochosa pouco fraturada, com comportamento estável ou aparentemente seco.	**Categoria 4** – Falso diagnóstico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(I)** Teste não recomendado.	Não testar, salvo justificativa robusta; verificar profundidade e integridade mecânica
PZ-160	Piezômetro em fundação rochosa pouco fraturada, com recomendação limitada à verificação de profundidade.	**Categoria 4** – Falso diagnóstico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(I)** Teste não recomendado.	Não testar, salvo justificativa robusta; verificar profundidade e integridade mecânica
PZ-306	Piezômetro em fundação rochosa de estrutura de concreto, com tendência de estabilização ou redução de subpressão.	**Categoria 4** – Falso diagnóstico; **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(I)** Teste não recomendado.	Não testar, salvo justificativa robusta; verificar profundidade e integridade mecânica
PZ-316	Piezômetro em fundação rochosa de estrutura de concreto, com comportamento compatível com baixa permeabilidade.	**Categoria 4** – Falso diagnóstico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(I)** Teste não recomendado.	Não testar, salvo justificativa robusta; verificar profundidade e integridade mecânica
PZ-321	Piezômetro em fundação rochosa de estrutura de concreto, com resposta histórica sem indicação de condição crítica.	**Categoria 4** – Falso diagnóstico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(I)** Teste não recomendado.	Não testar, salvo justificativa robusta; verificar profundidade e integridade mecânica

A **Tabela 4** confirma que, para os piezômetros avaliados em Xingó, predominou a classe (i) teste não recomendado. Essa conduta não significa ausência de controle, mas substituição do teste hidráulico por medidas menos invasivas, como verificação de profundidade, inspeção da integridade mecânica, análise da série histórica e comparação com instrumentos correlatos.

Como não foram identificados indícios associados a aumento de subpressão, surgência, perda de eficiência dos drenos ou comportamento estrutural adverso, a realização de testes de recuperação teria baixo benefício técnico e maior potencial de perturbação do sistema de monitoramento.

4.2. UHE Boa Esperança: Distinção Entre Comportamento Anômalo e Resposta Esperada

Na UHE Boa Esperança, a RPSB recomendou testes de recuperação para dois instrumentos: PZ-10, localizado no trecho 2 da barragem de terra-enrocamento, e PZ-11, instalado na fundação da estrutura de concreto do vertedouro [8]. O PZ-10 apresentou leituras acima do nível d'água de montante em períodos de estiagem, enquanto o PZ-11 registrou acréscimo de leitura da ordem de 5 m.c.a. no início de 2017 e posterior queda da cota aproximada de 299 m para 294,5 m.

A avaliação da UHE Boa Esperança evidenciou que leituras aparentemente incomuns não indicam, necessariamente, falha instrumental. No caso do PZ-10, o comportamento foi considerado compatível com sua posição na seção, com o histórico de aproximadamente 25 anos e com o efeito de defasagem temporal (*time lag*) entre as variações do reservatório e a resposta piezométrica, o que justificou a não realização de teste de recuperação.

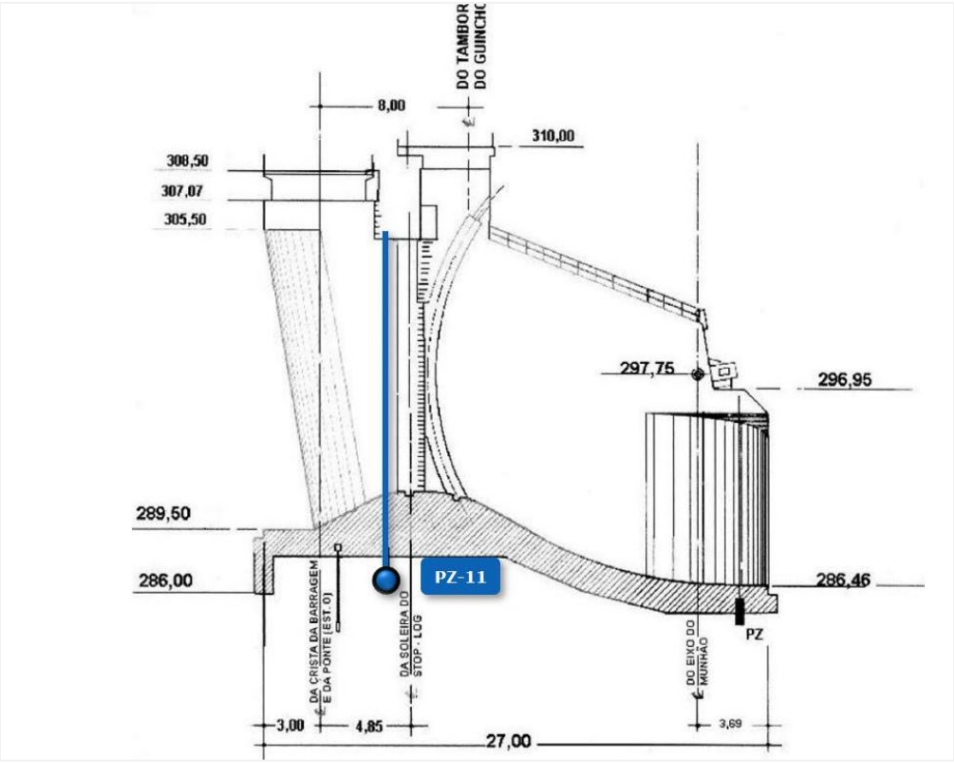


Figura 4 - Locação do PZ-11 na fundação do vertedouro da UHE Boa Esperança.

Fonte: AXIA Energia Nordeste, 2026; SBB Engenharia – Relatório UHE Boa Esperança, 2025.

O tratamento proposto para o PZ-11 é importante porque ilustra uma alternativa intermediária entre não fazer nada e executar teste de recuperação pleno. O estudo sugere tentativa de desobstrução por mangueira flexível, retirada de água acumulada entre elevações aproximadas e uso eventual de ar comprimido com baixa pressão, como bomba manual, para provocar rebaixamento limitado da coluna d'água. O procedimento não tem a finalidade de impor uma carga de ensaio ao maciço, mas de remover uma possível obstrução localizada.

Os dois instrumentos avaliados exigiram interpretações distintas, embora ambos tivessem sido indicados para teste de recuperação. O enquadramento na matriz de decisão permitiu diferenciar uma leitura compatível com a resposta hidráulica da seção, no caso do PZ-10, de uma possível obstrução localizada, no caso do PZ-11. Essa distinção orientou condutas diferentes, conforme sintetizado na **Tabela 5**.

Tabela 5 - Enquadramento dos piezômetros da UHE Boa Esperança na matriz de decisão para testes de recuperação.

INST.	ENQUADRAMENTO NA MATRIZ DE DECISÃO	CATEGORIA DE RISCO PREDOMINANTE	CLASSE DE DECISÃO	CONDUTA OBSERVADA
PZ-10	Leitura defasada em relação ao reservatório, associada à *time lag*, armazenamento ou resposta sazonal da seção.	**Categoria 4** – Falso diagnóstico. **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(i)** Teste não recomendado	Avaliar série histórica e instrumentos correlatos antes de intervir
PZ-11	Suspeita localizada de obstrução, com possível bloqueio mecânico, incrustação ou coluna d'água acumulada.	**Categoria 3** – Colmatação/obstrução **Categoria 1** – Perda temporária ou prolongada de funcionalidade.	**(iii)** Manutenção seletiva ou desobstrução	Desobstrução seletiva com baixa pressão; registrar limites e resposta pós-intervenção

A **Tabela 5** mostra que a decisão não deve ser tomada apenas pela aparência da leitura, mas pela interpretação do comportamento do instrumento em seu contexto. Para o PZ-10, a conduta mais adequada foi não realizar teste de recuperação, preservando a série histórica e avaliando instrumentos correlatos. Para o PZ-11, a suspeita de obstrução justificou manutenção seletiva ou desobstrução com baixa pressão, desde que acompanhada de registro dos limites aplicados e da resposta pós-intervenção.

4.3. UHE Sobradinho: Diversidade de Posições e Necessidade de Decisão Individualizada

O UHE Sobradinho representa a situação mais ampla do estudo, com 41 piezômetros indicados pela RPS para testes de recuperação, distribuídos na barragem de terra da margem esquerda, nos diques A, B e C e nas estruturas de concreto, incluindo casa de força, eclusa, vertedouro e descarregador de fundo [9]. A complexidade do caso decorre da diversidade de materiais e posições dos instrumentos: filtros horizontais, núcleos, fundações, zonas a jusante e contatos associados a estruturas de concreto.

O estudo destaca que a recomendação original da RPSB incluía piezômetros de tubo aberto que apresentavam comportamentos incomuns ou se encontravam secos nos últimos anos. Entretanto, a análise individualizada mostrou que a mesma recomendação não poderia ser aplicada de modo uniforme. Em alguns piezômetros instalados em filtros horizontais, o comportamento seco era compatível com drenagem eficiente e linha freática abaixo do filtro. Em piezômetros instalados em núcleo, a introdução de água foi considerada indesejável devido ao risco de fraturamento hidráulico. Em fundações mais a jusante, o histórico de estabilização e ausência de influência direta do reservatório indicou normalidade.

Da análise dos 41 piezômetros segue a descrição de alguns destaques. Os piezômetros PZ-1 (**Figura 5**), PZ-3 e PZ-13, instalados em filtro horizontal, o teste de recuperação foi admitido apenas de forma limitada, com carga máxima de 10 m.c.a. e pequeno volume de água, pois a expectativa era de rápida dissipação pelo sistema drenante. Em contraste, o PZ-7, instalado no núcleo do Dique A, foi classificado como caso de alto risco, devendo-se evitar novos testes com introdução de água devido ao potencial de fraturamento hidráulico e alteração da série histórica.

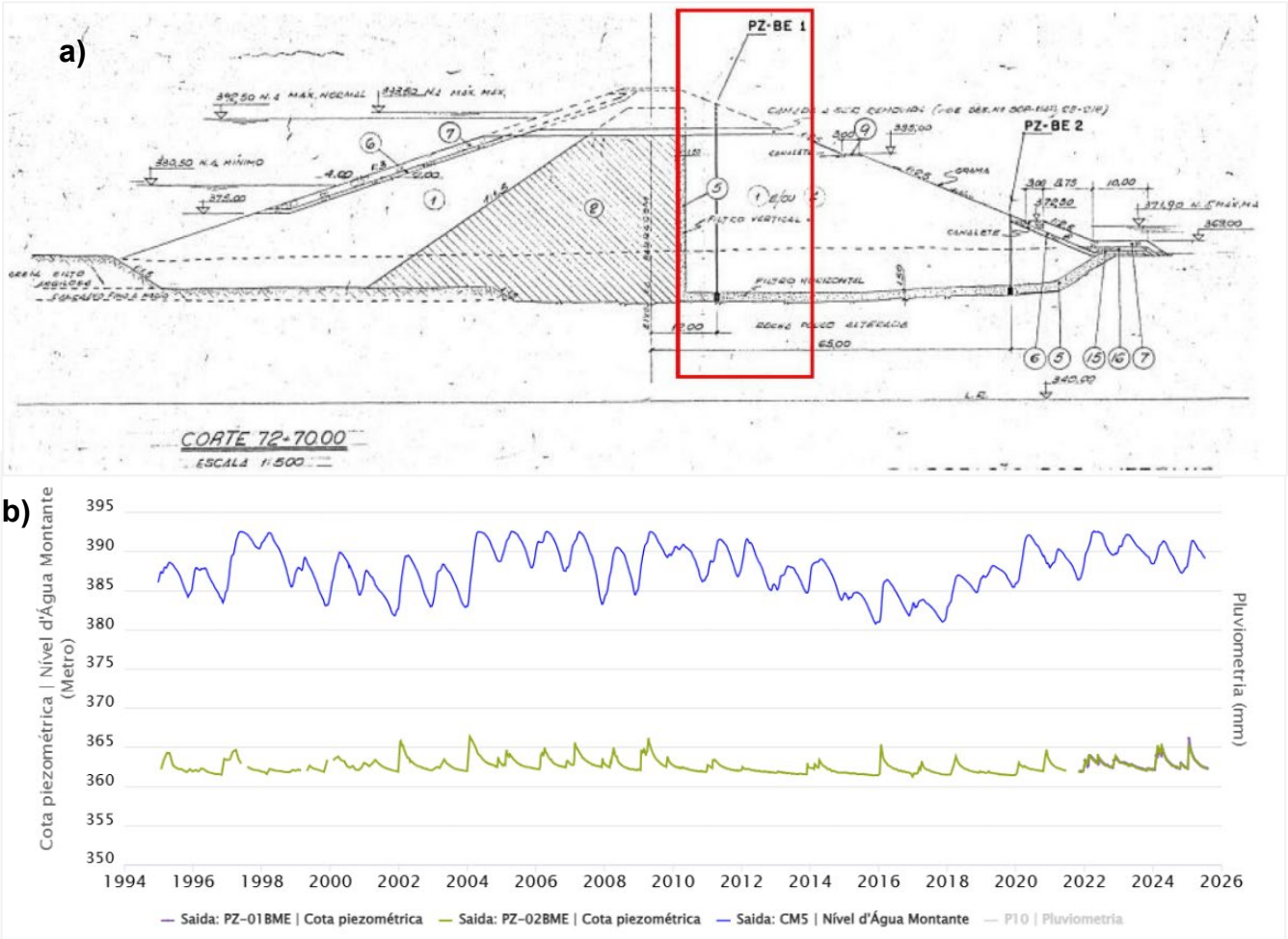


Figura 5 - PZ-1 na barragem de terra da margem esquerda: a) locação em filtro horizontal e b) comportamento seco.

Fonte: AXIA Energia Nordeste, 2026.

No Dique B, o PZ-22 foi inicialmente indicado por se apresentar seco, mas a análise histórica mostrou resposta anterior ao reservatório, redução gradual possivelmente associada à sedimentação a montante e posterior retorno a comportamento considerado normal, não justificando teste de recuperação.

A **Tabela 6** sintetiza o enquadramento dos piezômetros de Sobradinho a partir da matriz de decisão proposta, relacionando a condição observada, a categoria de risco, a classe de decisão e a conduta adotada. O agrupamento foi feito por similaridade de comportamento e de recomendação, evitando a repetição de instrumentos com a mesma interpretação técnica.

Tabela 6 - Enquadramento dos piezômetros UHE Sobradinho na matriz de decisão para testes de recuperação.

INST.	ENQUADRAMENTO NA MATRIZ DE DECISÃO	CATEGORIA DE RISCO PREDOMINANTE	CLASSE DE DECISÃO	CONDUTA OBSERVADA
BTME: PZ-1, PZ-3 e PZ-13; **Dique C:** PZ-1, PZ-5 e PZ-7	Filtro horizontal seco ou com baixa resposta.	**Categoria 1** – Perda temporária ou prolongada de funcionalidade.	**(ii)** Teste limitado e controlado	Testar só com pequeno volume e carga máxima definida.
BTME: PZ-4 e PZ-14; **Dique C:** PZ-2, PZ-16, PZ-18 e PZ-19	Fundação ou jusante com condição seca/estável compatível com a seção.	**Categoria 4** – Falso diagnóstico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(i)** Teste não recomendado	Não testar; verificar profundidade e integridade.
Dique A: PZ-7	Núcleo argiloso.	**Categoria 2** – Fraturamento hidráulico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(i)** Teste não recomendado	Evitar introdução de água; priorizar inspeção e análise de instrumentos vizinhos.
Dique A: PZ-9	Histórico de perturbação por teste anterior.	**Categoria 1** – Perda temporária ou prolongada de funcionalidade **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(i)** Teste não recomendado	Evitar nova intervenção; avaliar a série histórica.
Dique A: PZ-14, PZ-15, PZ-16, PZ-38, PZ-53 e PZ-54; **Dique B**: PZ-17, PZ-18 e PZ-22	Comportamento compatível com a posição do instrumento.	**Categoria 4** – Falso diagnóstico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(i)** Teste não recomendado	Não testar por leitura seca, estável ou pouco variável.
Dique A: PZ-33	Elevação anterior estabilizada e abaixo do valor de referência.	**Categoria 4** – Falso diagnóstico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(iv)** Substituição ou reavaliação futura	Não testar de imediato; manter atenção especial.
Dique A: PZ-37	Núcleo com comportamento incompatível.	**Categoria 2** – Fraturamento hidráulico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(iv)** Substituição ou reavaliação futura	Desativar de forma controlada.

INST.	ENQUADRAMENTO NA MATRIZ DE DECISÃO	CATEGORIA DE RISCO PREDOMINANTE	CLASSE DE DECISÃO	CONDUTA OBSERVADA
Dique A: PZ-39	Instrumento inoperante ou com provável obstrução.	**Categoria 3** – Colmatação/obstrução **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(iv)** Substituição ou reavaliação futura	Desativar ou reavaliar substituição.
Dique B: PZ-15, PZ-16, PZ-19	Núcleo com comportamento incompatível.	**Categoria 2** – Fraturamento hidráulico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(iv)** Substituição ou reavaliação futura	Desativar de forma controlada.
Dique C: PZ-21	Locação não confirmada e interpretação inconclusiva.	**Categoria 4** – Falso diagnóstico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(iv)** Substituição ou reavaliação futura	Confirmar cadastro, profundidade e função antes de intervir.
Casa de Força: PZ-30, PZ-31, PZ-32, PZ-33, PZ-34 e PZ-35PZ-30, PZ-31, PZ-32, PZ-33, PZ-34, PZ-35	Leituras estabilizadas ou associadas ao reservatório.	**Categoria 1** – Perda temporária ou prolongada de funcionalidade **Categoria 4** – Falso diagnóstico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(i)** Teste não recomendado	Manter acompanhamento; não realizar teste de recuperação.
PH-17, PH-06	Leituras consistentes com o reservatório.	**Categoria 4** – Falso diagnóstico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(i)** Teste não recomendado	Manter operação e acompanhamento.
Vertedouro: PZ-21, PZ-22 e PZ-23; **Descarregador de Fundo**: PZ-24, PZ-25, PZ-26, PZ-27, PZ-28 e PZ-29	Estruturas de concreto com comportamento estabilizado.	**Categoria 1** – Perda temporária ou prolongada de funcionalidade **Categoria 4** – Falso diagnóstico **Categoria 5** – Perda de continuidade da série histórica.	**(i)** Teste não recomendado	Manter acompanhamento, sem introdução de água.

*BTME: Barragem de Terra Margem Esquerda

Observa-se, na **Tabela 6**, que a maior parte dos instrumentos não foi enquadrada como caso de teste de recuperação convencional. Predominaram situações em que a leitura seca, estável ou pouco variável era compatível com a posição do piezômetro, ou em que a intervenção poderia gerar falso diagnóstico, perda de continuidade da série histórica ou risco de fraturamento hidráulico. Assim, os testes ficaram restritos aos instrumentos em filtros horizontais e em condições de menor risco, enquanto os casos em núcleo, fundação ou estruturas de concreto exigiram preservação da série, verificação mecânica, acompanhamento ou desativação controlada.

5. DISCUSSÃO INTEGRADA

A comparação dos três casos mostra que o estado 'seco' possui significados diferentes. Em filtro horizontal, pode indicar drenagem eficiente. Em fundação rochosa pouco permeável, pode indicar ausência de conexão hidráulica ativa ou baixa subpressão. Em período de estiagem, pode ser efeito sazonal. Em instrumento com histórico de leitura interrompida, pode indicar obstrução. Portanto, a pergunta correta não é 'o piezômetro está seco?', mas 'o piezômetro deveria estar registrando água nesta posição e nesta condição hidráulica?'.

Essa mudança de pergunta é decisiva. Se a seção mostra que o instrumento está acima da linha freática esperada, um teste de recuperação pouco acrescenta. Se instrumentos vizinhos confirmam a condição seca, o teste pode ser desnecessário. Se a inspeção visual e as vazões de drenagem não indicam alteração, a intervenção pode ser menos útil que a preservação da série. Por outro lado, se o instrumento é crítico para controlar um mecanismo de falha e a perda de leitura compromete a segurança, a substituição ou recuperação seletiva pode ser justificável.

A análise reforça também que recomendações de RPSB precisam ser escritas com maior precisão. A recomendação 'realizar teste de recuperação' deve informar qual hipótese será testada, quais riscos existem, quais limites serão adotados e qual decisão será tomada com o resultado. Sem isso, a recomendação transfere ao executor uma decisão técnica que deveria estar fundamentada no próprio diagnóstico.

A literatura recente de barragens enfatiza que o monitoramento deve estar vinculado à gestão baseada em risco, aos mecanismos potenciais de falha e às consequências associadas à perda de informação relevantes para a tomada de decisão [10], [15], [18]. Nessa abordagem, a instrumentação deve responder a perguntas de segurança: a subpressão está aumentando em uma fundação? A linha freática está migrando para jusante? O filtro está drenando? Há indício de erosão interna? O comportamento observado reduz ou aumenta a incerteza sobre um mecanismo de falha?

Quando o instrumento não está associado a um mecanismo crítico, ou quando há redundância suficiente, a recuperação pode ser postergada ou substituída por monitoramento indireto. Quando o instrumento é único e controla condição relevante, a decisão pode ser recuperar ou substituir, mas não necessariamente por teste com água. A resposta pode ser inspeção física, verificação de profundidade, limpeza mecânica, desobstrução de baixa pressão, instalação de instrumento complementar ou revisão dos níveis de controle.

A matriz de decisão proposta neste artigo é compatível com esse raciocínio. Ela evita tanto o imobilismo quanto a intervenção automática. Em segurança de barragens, a omissão é perigosa, mas a intervenção mal planejada também é. O objetivo é selecionar a ação proporcional ao risco e à incerteza.

A contribuição prática deste trabalho é transformar uma discussão recorrente de manutenção de instrumentação em uma decisão de engenharia baseada em evidências. O artigo não defende que piezômetros sem resposta sejam ignorados. O ponto é mais preciso: a ausência de resposta deve ser investigada com método, e o teste de recuperação é apenas uma das alternativas disponíveis.

Os três casos mostram que a recomendação de teste deve ser subordinada ao papel do instrumento na segurança da barragem. Na UHE Xingó, a fundação rochosa de baixa permeabilidade torna o teste potencialmente contraproducente. Em Boa Esperança, o PZ-10 não justifica teste por apresentar resposta compatível com *time lag*, enquanto o PZ-11 admite intervenção seletiva de baixa pressão. Por fim, em Sobradinho, a diversidade de posições exige que filtros, núcleos, fundações e estruturas de concreto sejam tratados separadamente.

Essa sistematização é útil para empreendedores, consultores e revisores porque reduz a chance de recomendações genéricas que podem introduzir outros problemas. Também contribui para a gestão do acervo histórico de instrumentação, uma vez que preservar uma série confiável pode ser mais valioso que forçar uma resposta artificial.

6. CONCLUSÕES

• A realização indiscriminada de testes de recuperação em piezômetros não é tecnicamente justificada em barragens em operação. O teste deve ser entendido como intervenção no sistema monitorado, não como simples procedimento de rotina.

• Piezômetros secos ou com leituras constantes não são necessariamente instrumentos defeituosos. Em filtros horizontais, fundações de baixa permeabilidade e períodos de estiagem, esse comportamento pode ser compatível com a seção e com a hidráulica local.

• Em fundações rochosas granito-gnaisse pouco fraturadas, como observado na UHE Xingó, a baixa permeabilidade pode produzir recuperação muito lenta após qualquer perturbação, tornando o teste potencialmente prejudicial à continuidade da série histórica.

• Na UHE Boa Esperança, o PZ-10 demonstra que leituras aparentemente acima do nível d'água de montante podem decorrer de defasagem temporal e da posição do instrumento. Já o PZ-11 mostra que, quando há suspeita de obstrução, a intervenção deve ser seletiva e de baixa pressão, e não necessariamente um teste de recuperação convencional.

• Na UHE Sobradinho, a análise de 41 piezômetros comprova que a posição do instrumento é o principal critério de decisão. Instrumentos em filtro podem admitir teste limitado; instrumentos em núcleo devem evitar introdução de água; instrumentos em fundação ou estruturas de concreto exigem avaliação de histórico, drenagem e redundância.

• Vale ressaltar, que as usinas hidrelétricas as quais foram estudo de caso desse artigo, apresentam-se íntegros e em bom estado de conservação e operacionalidade. E a partir das observações e diagnósticos obtidos pela última análise do comportamento das estruturas civis, com base no monitoramento de auscultação civil foi estabelecido, por meio dos relatórios de inspeção de segurança regular, o nível de segurança dos três empreendimentos como NORMAL.

• Recomenda-se que futuras RPSB substituam recomendações genéricas por critérios objetivos: hipótese técnica, posição do instrumento, risco de intervenção, limites de carga/volume/pressão, frequência de leitura pós-teste e decisão esperada com o resultado.

• A gestão segura da instrumentação deve combinar inspeções visuais, análise de séries históricas, instrumentos correlatos, manutenção seletiva e tomada de decisão baseada em risco. Testar menos, quando não há justificativa, pode ser tecnicamente mais seguro do que testar por rotina.

7. PALAVRAS-CHAVE

Piezômetros; testes de recuperação; instrumentação de barragens; subpressão; segurança de barragens; tomada de decisão.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.

[2] BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334/2010 e reforça dispositivos da Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.

[3] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Manual de Segurança e Inspeção de Barragens. Brasília: ANA.

[4] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens. Brasília: ANA, 2016.

[5] HVORSLEV, M. J. Time lag and soil permeability in ground-water observations. Bulletin n. 36. Vicksburg: U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, 1951.

[6] DUNNICLIFF, J. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. New York: John Wiley & Sons, 1993.

[7] SBB ENGENHARIA. Relatório de Avaliação das Recomendações do RPS da Barragem de Xingó sobre os Testes de Recuperação de Piezômetros. RT-SBB-UHXI-200-R0. São Carlos, 2025.

[8] SBB ENGENHARIA. Relatório de Avaliação das Recomendações da RPSB da Barragem de Boa Esperança sobre os Testes de Recuperação de Piezômetros. RT-SBB-UHBE-203-R3. São Carlos, 2025.

[9] SBB ENGENHARIA. Relatório de Avaliação das Recomendações da RPS da Barragem sobre os Testes de Recuperação de Piezômetros na UHE Sobradinho. RT-SBB-UHSB-200-R3. São Carlos, 2025.

[10] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Bulletin 158: Dam Surveillance Guide. Paris: ICOLD, 2013.

[11] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). EM 1110-2-1908: Instrumentation of Embankment Dams and Levees. Washington, D.C.: Department of the Army, 2020.

[12] U.S. BUREAU OF RECLAMATION (USBR). Design Standards No. 13: Embankment Dams, Chapter 11 - Instrumentation and Monitoring. Denver: Bureau of Reclamation, 2014.

[13] SILVEIRA, João Francisco Alves. Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

[14] SILVEIRA, João Francisco Alves. Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de concreto. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

[15] FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION (FERC). Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects, Chapter 9 - Instrumentation and Monitoring. Washington, D.C.: FERC.

[16] FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA). Federal Guidelines for Dam Safety. Washington, D.C.: FEMA, 2004.

[17] FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA). Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management. FEMA P-1025. Washington, D.C.: FEMA, 2015.

[18] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Bulletin 180: Dam Surveillance - Lessons Learnt from Case Histories. Paris: ICOLD, 2018.

[19] ASTM INTERNATIONAL. ASTM D4044/D4044M-15: Standard Test Method for Field Procedure for Instantaneous Change in Head (Slug) Tests for Determining Hydraulic Properties of Aquifers. West Conshohocken: ASTM International.

[20] CUNNINGHAM, W. L.; SCHALK, C. W. Groundwater Technical Procedures of the U.S. Geological Survey: GWPD 17 - Conducting an Instantaneous Change in Head (Slug) Test. Reston: USGS, 2011.

[21] DUNNICLIFF, J. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. New York: John Wiley & Sons, 1993.

9. CURRÍCULOS DOS AUTORES



Clécio BARBOSA
Engenheiro Civil da AXIA Energia Nordeste, com especialização e atuação em segurança de barragens, instrumentação, monitoramento de estruturas hidráulicas e gestão de riscos. Mestre em Ciências Geodésicas pela universidade Federal de Pernambuco, doutorando na Universidade Técnica de Berlim - Alemanha.



João Francisco ALVES SILVEIRA
Atua em Instrumentação e Segurança de Barragens desde 1973, com participação em projetos e análises de usinas como Itaipu, Água Vermelha, Xingó e Belo Monte. Em julho de 2017, recebeu em Praga, República Tcheca, a comenda de Membro Honorário da ICOLD, por indicação do CBDB. Autor de três livros técnicos e 135 trabalhos publicados, é Diretor Técnico da SBB Engenharia, em São Carlos/SP.



Fabiola BARROS
Engenheira Civil da AXIA Energia Nordeste, com atuação em segurança de barragens, inspeções, acompanhamento de instrumentação, gestão de documentação técnica e apoio a processos de revisão periódica de segurança de barragens.



Filipe ANDRADE LIMA PIMENTEL
Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Tocantins (2020), Especialização em Engenharia de Barragens pela PUC Minas (2023), MBA em Gestão de Projetos pela USP/Esalq (2024), Especialização em Segurança do Trabalho pela Unicesumar (2024). Atua como engenheiro civil da AXIA Energia Nordeste na área de segurança de barragem e manutenção civil da geração.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

UHE AMADOR AGUIAR II - DIAGNÓSTICO DA ORIGEM DA UMIDADE EM BERMAS DA BARRAGEM POR MEIO DE INSTRUMENTAÇÃO E INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

Cleber José de CARVALHO
Engenheiro Civil – ALIANÇA Geração de Energia S.A.

Leonardo Teixeira de AQUINO
Engenheiro Civil – ALIANÇA Geração de Energia S.A.

Ana Paula Borges MARCELINO
Engenheiro Civil – ALIANÇA Geração de Energia S.A.

Cláudio Casagrande ROBERTO
Engenheiro Civil – ALIANÇA Geração de Energia S.A.

Walter Luiz Alves de Oliveira JUNIOR
Engenheiro Civil – Consórcio Capim Branco Energia

RESUMO

Em 2019, foi identificada na UHE Amador Aguiar II a presença de umidade em uma berma intermediária da barragem de terra, protegida com enrocamento. A anomalia foi registrada e ações de monitoramento e análise foram intensificadas, visando diagnosticar a origem da água e o seu potencial de afetar a segurança da estrutura.

As análises da instrumentação existente apontaram para normalidade, entretanto a permanência da água no período seco (cerca de 90 dias sem precipitação) indicou a necessidade de expandir as investigações, aprofundar o conhecimento e estabelecer o diagnóstico definitivo do problema.

O monitoramento foi ampliado para outras seções da barragem por meio da instalação de medidores de nível d'água e piezômetros, para verificar se a anomalia se concentrava apenas naquela região. Complementarmente, foi realizada prospecção por meio de sondagem geofísica, cujos dados foram confrontados com a instrumentação e os registros construtivos da barragem, contribuindo expressivamente para estabelecer o diagnóstico final e definir as ações de controle pertinentes.

O estudo destaca a relevância da integração entre métodos diretos e indiretos na identificação, interpretação e controle de anomalias em barragens de terra, particularmente quando a instrumentação convencional indica comportamento normal.

ABSTRACT

In 2019, localized moisture was observed on an intermediate berm of the Amador Aguiar II Hydroelectric Power Plant (HPP) earthfill dam, whose downstream slope is protected by rockfill. The occurrence was formally recorded as an anomaly, triggering intensified monitoring and analytical activities aimed at identifying the water source and evaluating potential implications for dam performance and safety.

Initial interpretation of the existing instrumentation indicated no abnormal responses. However, the persistence of moisture throughout the dry season—approximately 90 consecutive days without precipitation—suggested that recent rainfall alone was unlikely to explain the phenomenon, thereby justifying an expanded investigation program to support a conclusive diagnosis.

Accordingly, the dam surveillance system was extended to additional sections through the installation of water-level indicators and piezometers to assess the spatial extent of the anomaly and distinguish a localized condition from a broader pattern of seepage or water accumulation. In parallel, targeted geophysical surveys were conducted. The geophysical results were integrated with the instrumentation dataset and cross-checked against construction records, which significantly strengthened the interpretative framework and supported both the final diagnosis and the definition of appropriate control and mitigation measures.

Overall, the study highlights the importance of integrating direct methods and indirect methods to improve the detection, interpretation, and management of anomalies in earth dams, particularly when conventional instrumentation indicates normal behavior.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A UHE Amador Aguiar II, também conhecida como Capim Branco II, foi construída de março de 2004 a abril de 2007 e possui capacidade total instalada de 210 MW.

O empreendimento localiza-se na Bacia do Rio Araguari, nos municípios de Araguari, Uberlândia e Tupaciguara no estado de Minas Gerais, conforme apresentado na Figura 1.

O arranjo geral do barramento (Figura 2) é constituído por uma barragem principal de terra homogênea na margem esquerda, transicionada para uma barragem de enrocamento com núcleo argiloso no encontro com a barragem de CCR, seguida da tomada d'água tipo gravidade, vertedouro de descarga controlada e uma barragem de enrocamento com núcleo argiloso de fechamento na margem direita.

A barragem principal tem 1.120 m de comprimento, crista na El. 567,30 m e altura máxima de 57 m.

O circuito de geração localiza-se na margem direita e consiste em um canal de adução e aproximação compartilhados, tomada d'água para três condutos forçados em aço expostos e casa de força tipo abrigada com três unidades geradoras tipo Francis e capacidade unitária de 70 MW.

O vertedouro é do tipo perfil Creager controlado com três comportas e encontra-se na ombreira direita com capacidade de extravasar vazão de projeto equivalente a 8.920 m³/s.

O reservatório tem um volume máximo de 872,83 hm³ e área inundada de 46,83 km². O N.A. máximo normal do reservatório é 565,00 m.

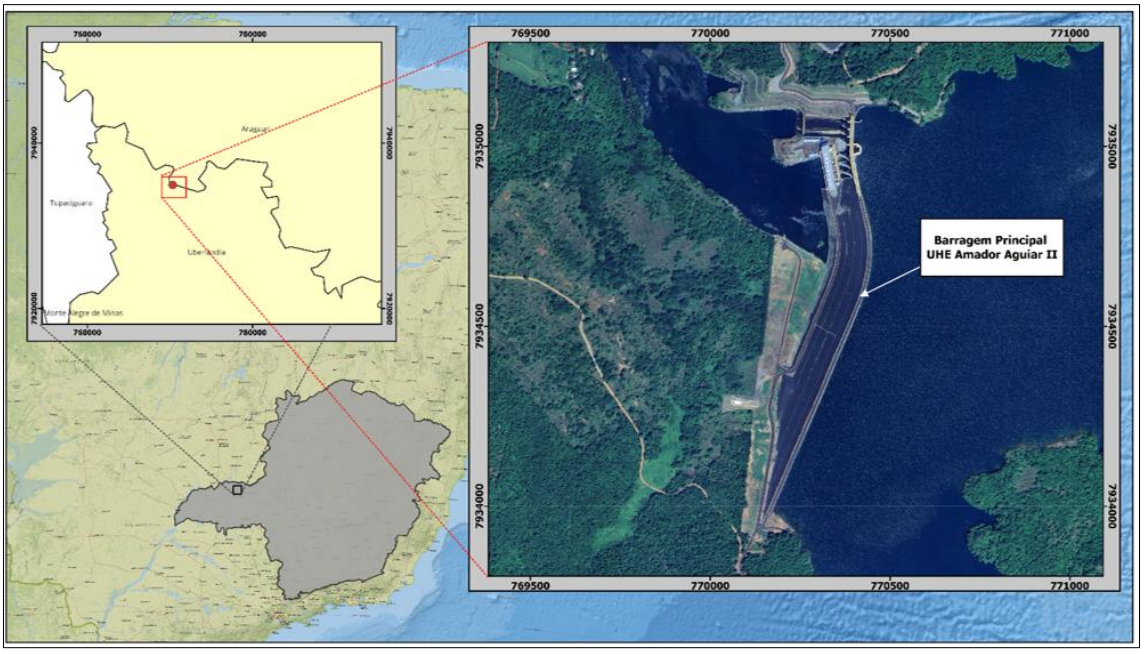


Figura 1 – Localização da UHE Amador Aguiar II.

Em 2019, a Inspeção de Segurança Regular [1] identificou região úmida próximo da estaca 47+0,00 m, berma 538,00 m da barragem de terra. Notou-se inclusive a presença de musgo, em ambiente caracterizado pela desagregação do basalto e favorável à proliferação da espécie. A anomalia foi registrada para execução das

ações apropriadas. A recomendação inicial foi de acompanhar e iniciar o processo de análise para determinação das causas e consequências da umidade na área.

Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo de caracterizar a usina hidrelétrica em questão, sob a ótica da segurança geotécnica de barragens, detalhar o processo de diagnóstico de causa-raiz da anomalia, avaliar implicações e as medidas adotadas após a conclusão dos estudos.

2. ASPECTOS DE PROJETO E CONSTRUÇÃO

A Barragem Principal da UHE Amador Aguiar II é composta de uma seção de terra homogênea na margem esquerda, e um pequeno trecho de enrocamento com núcleo argiloso transicionando para a barragem de concreto, tomada d'água, bloco de ligação, vertedouro e uma pequena barragem de fechamento na ombreira direita.

A fundação da barragem na ombreira esquerda está assentada sobre solo residual de quartzo-micaxisto, enquanto nas regiões do leito do rio e estruturas de concreto se apoiam em rocha sã. O sistema de drenagem interno é composto de um filtro vertical de 0,60 m de largura e um tapete drenante horizontal, estendendo-se até a base do *cut-off*. O coroamento possui 9,20 m de largura e encontra-se na elevação 566,50 m, com taludes de jusante variando de 1,3H:1V no trecho de enrocamento com núcleo, 1,8H:1V entre a crista e a berma superior (El. 558,00 m), e 1,9H:1V nas bermas inferiores até o pé da barragem. O talude de montante é protegido por *rip-rap* de blocos basálticos e xistosos. O barramento possui altura máxima de 57 m na região da barragem de terra e enrocamento e 50 m de altura na barragem de terra. O núcleo da barragem foi construído com solo coluvionar maduro de quartzo-micaxisto e basalto, enquanto os espaldares foram executados em solo residual jovem de quartzo-micaxisto. A Figura 2 mostra o arranjo geral das estruturas.

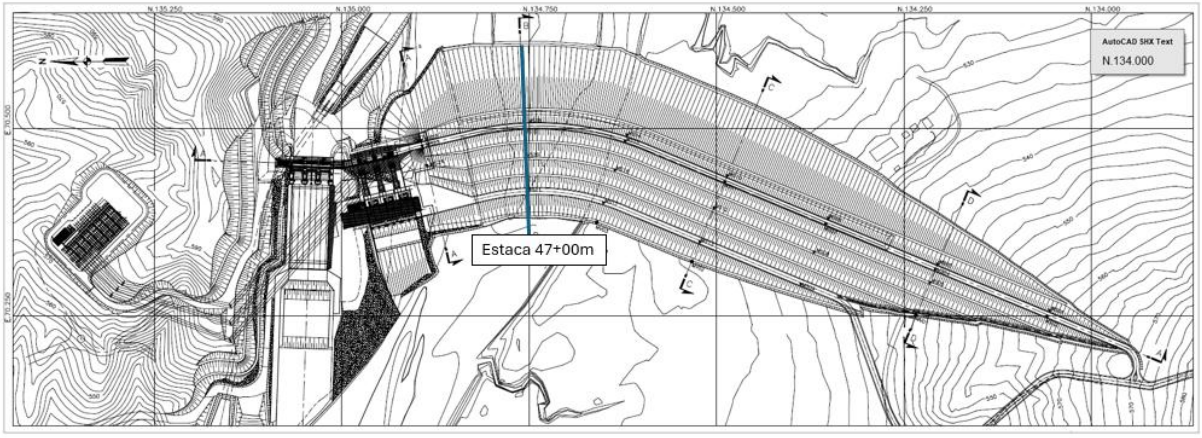


Figura 2 – Arranjo geral das estruturas.

Embora a Barragem Principal tenha sido composta de uma seção de terra homogênea, foram criadas zonas de lançamento utilizando materiais selecionados e aplicados na região de montante e central, inclusive com coloração variada do material que pode ser observado na Figura 3.



Figura 3 – Vista geral das obras em julho de 2005.

A Figura 4 apresenta a seção típica da Barragem Principal da UHE Amador Aguiar II, identificando os pontos citados.

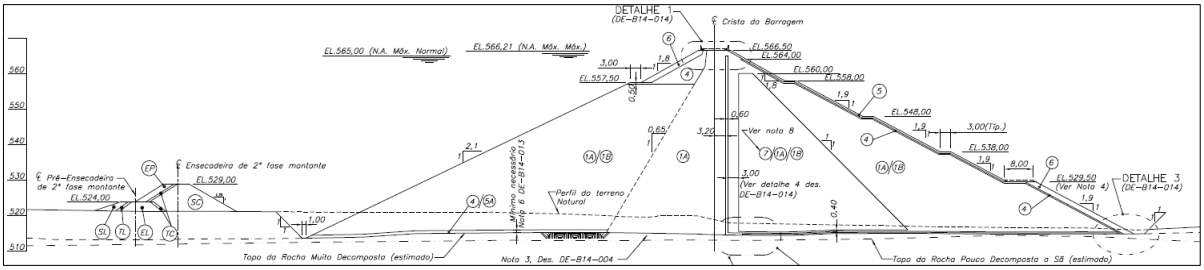


Figura 4 – Seção da estaca 47 + 0,00 m.

O talude de jusante é protegido com camada de enrocamento de 0,50 m de espessura e uma transição única de 0,40 m. Destaca-se que o projeto não previu a implantação de dispositivos de drenagem superficial (canaletas) para coleta e direcionamento da água pluvial de taludes e bermas para o pé da barragem.

3. DISCUSSÕES E ESTUDOS INICIAIS

Durante as discussões das possíveis causas para a presença de umidade na proximidade da estaca 47+0,00 m, a hipótese de a origem ser pluvial foi considerada a mais provável, entretanto a busca por evidências tornou-se necessária. Nesse sentido, observou-se que as bermas inferiores apresentavam maior acúmulo de água quando comparadas com as superiores. Aparentemente, a transição não teria capacidade de conduzir as águas pluviais para o pé da barragem, sobretudo nos taludes e bermas inferiores que acumulam as águas dos taludes superiores. Além disso, o projeto executivo indicava que as bermas não possuíam declividade favorável ao fluxo, dificultando o escoamento para jusante.

O fato de encontrar água na transição dois meses depois da última precipitação suscitou a hipótese da formação de uma lente de saturação, que poderia avançar e se estender com o decorrer dos anos, modificando tensões efetivas no maciço e afetando a segurança do barramento.

Ressalta-se que os piezômetros existentes indicavam comportamento normal. Além disso, os deslocamentos verticais e horizontais também se mantinham dentro da normalidade, atestando a condição de segurança da barragem até o momento.

A hipótese de ter ocorrido falha construtiva no filtro vertical foi levantada, embora a instrumentação da seção indicasse normalidade. Assim, complementarmente, foi realizado um estudo de percolação, com uma modelagem que simulasse a barragem sem filtro, o que resultou em uma saída da linha freática abaixo da El.530,00 m, inferior às bermas onde a anomalia se manifestava. Portanto, essa hipótese foi descartada e reforçada a hipótese de origem pluvial.

Intensificando-se os estudos diagnósticos, foram realizadas ainda análises químicas de amostras de água coletadas no reservatório, na berma da El. 538,00 m e do medidor de vazão (VV001) instalado no pé da barragem [2].

O ponto de coleta no reservatório representa um ambiente mais diluído, com baixa mineralização, redutor e corrosivo.

Os pontos de coleta na berma El. 538,00 m (nichos) indicaram maior acúmulo de sólidos, matéria orgânica e minerais dissolvidos, além de alta presença microbiana e potencial incrustante, indicando que o compartimento não guarda relação com o reservatório.

O ponto de coleta do medidor de vazão indicou características de água filtrada, mais oxidada com menor presença de contaminantes.

Os resultados dos ensaios físico-químicos, microbiológicos e redox indicaram ausência de mistura efetiva entre as amostras avaliadas. Dessa forma, conclui-se que as águas das bermas não eram compatíveis com as águas do reservatório, nem com a água do sistema de drenagem interna.

Diante disso, fortaleceu-se a hipótese da origem pluvial e fez-se necessário investigar a abrangência da lente de umidade ou saturação e a profundidade avançada no sentido da fundação.

4. INVESTIGAÇÕES, INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO

Após as discussões iniciais, o processo de investigação da causa raiz da anomalia avançou dividindo-se em duas etapas principais:

- Primeira etapa: instalação da instrumentação complementar e monitoramento.
- Segunda etapa: levantamento geofísico por meio de caminhamento elétrico - eletrorresistividades e potencial espontâneo.

4.1 Instrumentação e Monitoramento

A barragem de terra é monitorada por meio de 4 seções, desde a interface com a estrutura de concreto até a ombreira esquerda. A Tabela 1 indica os tipos e as

quantidades de instrumentos instalados em operação desde a construção, considerando campanhas de ampliação executadas, que serão tratadas a seguir.

Tabela 1 – Instrumentação instalada na barragem de terra da margem esquerda

Tipo de Instrumento	Quantidade
Piezômetro elétrico de corda vibrante	20
Piezômetro Casagrande	17
Medidores de nível d'água	8
Medidores de vazão	3
Marcos de deslocamento superficial	30

Os dados resultantes das leituras da instrumentação desde o início da operação indicam a normalidade da operação das estruturas, condição atestada pelas Inspeções Regulares realizadas [3].

Em função da anomalia, em 2021 foram instalados dois medidores de nível d'água para monitoramento, sendo um na berma da El. 548,00 m e outro na El. 538,00 m, com profundidades de 9 e 8 m, respectivamente.

Esses instrumentos extras indicaram a presença de água no maciço nos anos subsequentes, com cerca de 6 m.c.a. aproximadamente, conforme Figura 5, no entanto sem alteração do comportamento dos demais instrumentos existentes na estaca 47+0,00 m, instalados de acordo com o projeto executivo.

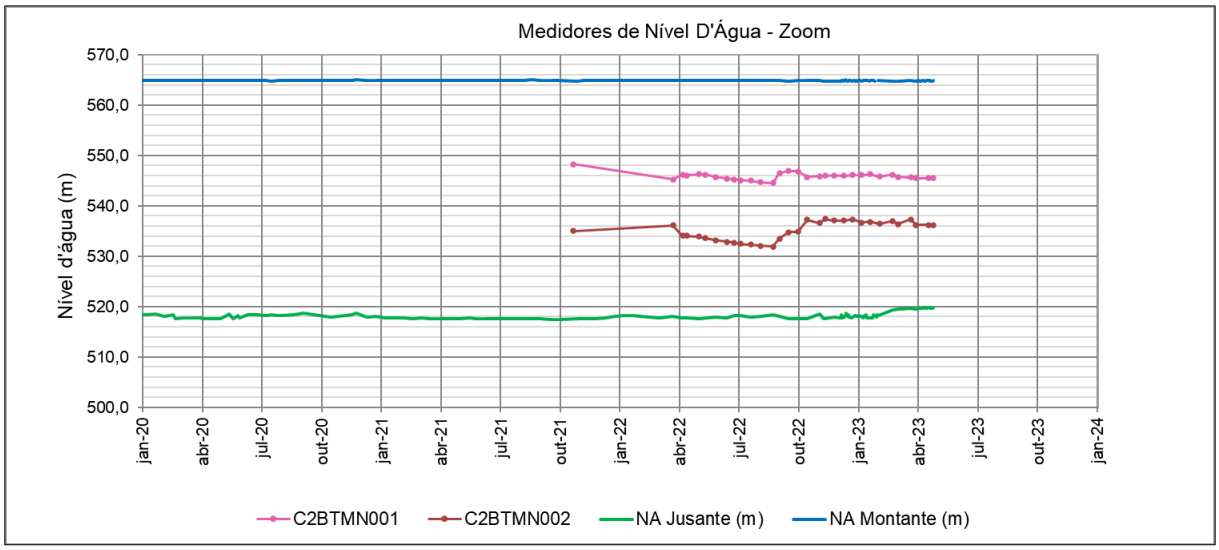


Figura 5 – Registro da instrumentação complementar - seção da estaca 47+0,00 m.

Diante das constatações, considerou-se necessário avaliar se a ocorrência se estendia por toda a barragem e bermas ou se a anomalia estava limitada à área próxima à estaca 47.

Em 2024, o monitoramento foi ampliado com a instalação de piezômetros e medidores de nível d'água. Inicialmente, foram instalados 8 instrumentos, sendo 3 piezômetros tipo Casagrande e 5 medidores de nível d'água.

A execução dos furos para a instalação dos instrumentos revelou a presença de água em quase todos os furos, motivando a ampliação do monitoramento, alcançando o quantitativo de 14 instrumentos. Durante os trabalhos, observou-se, ao remover o

enrocamento e a transição para execução dos furos, que o “nicho” formado na superfície da berma acumulava água, conforme Figura 6.



Figura 6 – Detalhe do nicho com água e equipe trabalhando na berma.

Destaca-se que a execução dos furos iniciou cerca de 60 dias depois da última chuva e ainda havia a presença de água na transição entre a proteção de enrocamento e o maciço. Por vezes, o recinto foi esgotado e a água retornava ao nível anterior.

A atividade de perfuração contou com método a percussão e trado buscando manter a integridade do maciço. Nessa campanha foram executados furos de até cerca de 30 m de profundidade. Foram executados furos em todas as bermas nas El. 558 m, 548 m, 538 m e 530 m, distribuídos longitudinalmente nas estacas 47, 40 e 33. Dos 14 instrumentos instalados na campanha de 2024, 2 foram instalados na estaca 18 + 0,00 m fora da região estudada.

A Figura 7 mostra a localização da instrumentação complementar, enquanto a Tabela 2 especifica os tipos e as quantidades instaladas.

Tabela 2 – Instrumentação complementar instalada na barragem de terra

Estaca	Instrumento	Quantidade
47 + 0,00	Piezômetro	3
	Medidor de Nível d’água	1
40 + 0,00	Medidor de Nível d’água	2
33 + 0,00	Piezômetro	3
	Medidor de Nível d’água	3

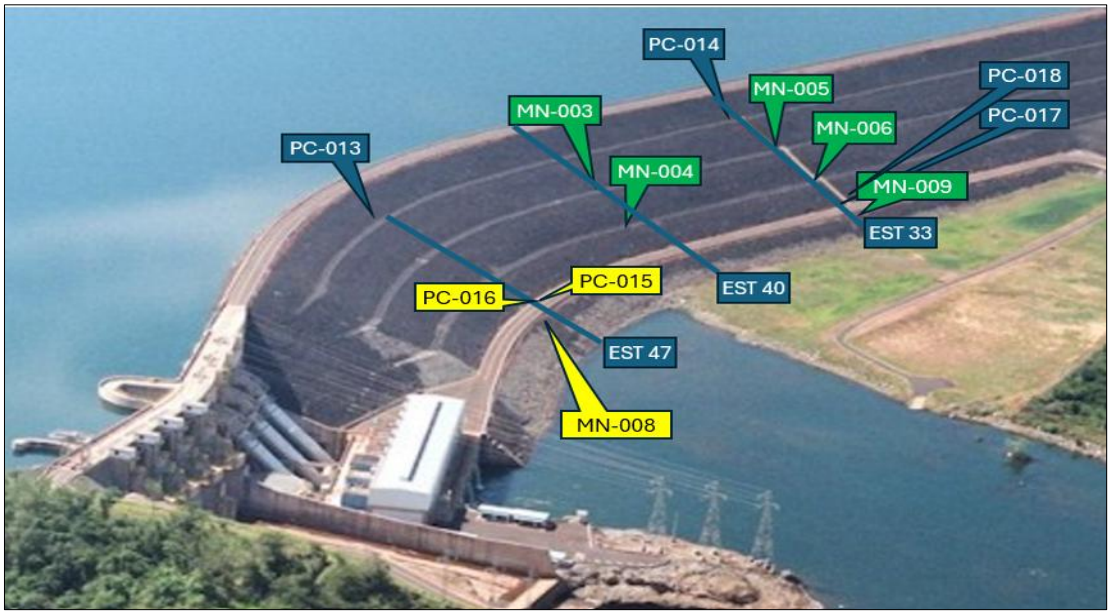


Figura 7 – Locação da instrumentação complementar

Na Figura 8 é apresentada a instrumentação da seção da barragem objeto de análise e diagnóstico, que também representa a seção mais alta da barragem de terra. A instrumentação exibida encontra-se em operação e inclui instrumentos instalados em 2021 e 2024.

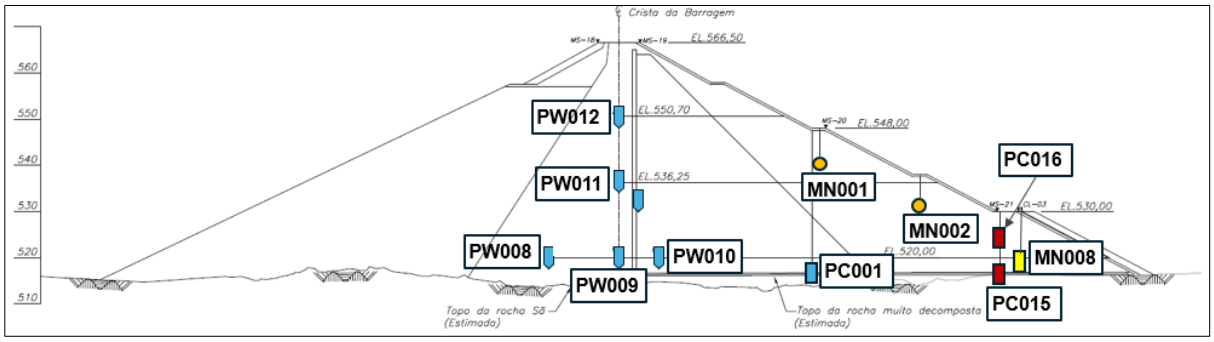


Figura 8 – Instrumentação instalada - seção da estaca 47+0,00 m

O monitoramento da instrumentação revelou que os níveis dos novos instrumentos se mantiveram próximos às cotas de fundo ou mesmo em condição seca e, no caso dos instrumentos antigos, houve estabilidade, permanecendo próximos das medidas históricas.

4.2 Geofísica

A realização de levantamentos geofísicos na barragem buscou investigar a origem e abrangência da anomalia, sendo adotados os métodos de Eletrorresistividade (ER) e Potencial Espontâneo (SP). Os levantamentos foram realizados em junho de 2025 com 7 seções de caminhamento elétrico (eletrorresistividade) e 7 seções de potencial espontâneo, sendo 4 seções longitudinais com cerca de 450 m de extensão e 3 seções com cerca de 220 m transversais ao barramento (Figura 9). Os eletrodos foram instalados com espaçamento de 5 m nas bermas El. 538 m e 548 m e nas outras seções o espaçamento foi de 7 m [4].

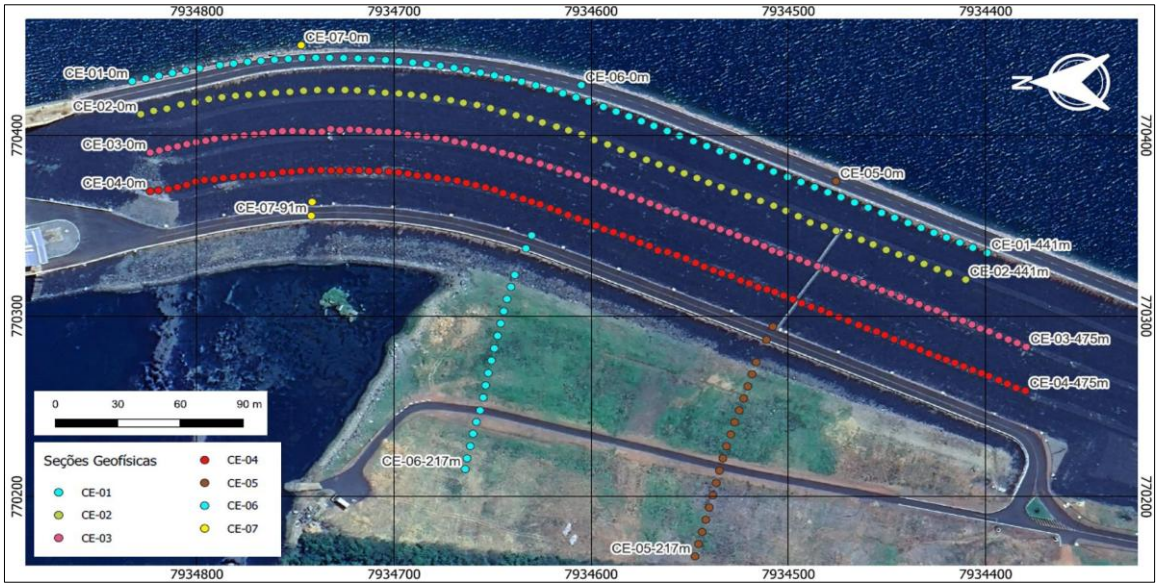


Figura 9 – Locação das linhas de levantamento geofísico

De acordo com Loke et al. (2020) [5], os levantamentos de resistividade elétrica mapeiam a estrutura da subsuperfície por meio de medições elétricas realizadas a partir da injeção de corrente no terreno através de dois eletrodos e da medição da diferença de potencial (ΔV) entre eles, possibilitando estimar variações de resistividade elétrica (ou condutividade) associadas aos materiais que compõem o subsolo. Dentre suas aplicações geológico-geotécnicas, destaca-se a identificação do nível freático e de zonas saturadas/úmidas.

O objetivo da execução da eletrorresistividade foi identificar porções eventualmente saturadas/úmidas no talude de jusante, geralmente representadas por medidas de resistividade iguais ou menores do que 150 e 100 Ohm.m, conforme apresentado na Tabela 3. O propósito foi verificar uma possível contribuição de água proveniente do reservatório (montante) para a umidade observada no talude de jusante.

Tabela 3 – Faixa de valores de resistividade para argilas e água doce

	Referência	Argila	Água Doce
Resistividade (Ohm.m)	ABNT 7117:2021	30 – 5.000	30
	Braga (2002)	10 – 20	50 – 100
	Fernandes (1984)	5 – 1.500	-
	Ferreira (2002)	1 – 100	10 – 100
	Loke (1999)	1 – 100	10 – 100
	Telford (1990)	1 - 100	0,5 – 150

Fonte: RELATÓRIO FINAL GEOFÍSICA_AMADOR AGUIAR II_REV00 [4].

O método do potencial espontâneo possibilita determinar a diferença de potencial natural entre dois pontos em subsuperfície. Em estudos geológico-geotécnicos, a diferença de potencial objeto de análise constitui-se a partir do fluxo de água subterrâneo acompanhado do carreamento de elétrons. O potencial espontâneo busca detectar anomalias negativas ou positivas, no intuito de interpretar zonas de recarga e descarga, respectivamente.

Considera-se como indicativo de uma zona preferencial de fluxo a região que apresenta, simultaneamente, valores elevados de potencial espontâneo

(aproximadamente > 30 mV) e baixos resistivos (< 150 Ohm.m), com continuidade lateral ou vertical. A Figura 10 mostra os resultados para os levantamentos de potencial espontâneo para a mesma área.

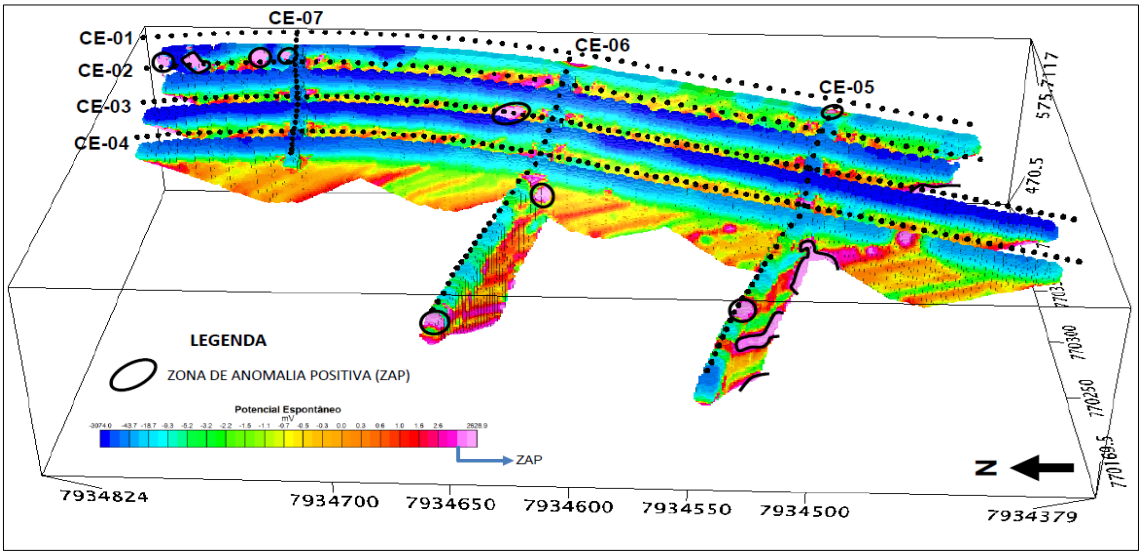


Figura 10 - Vista 3D dos valores de potencial espontâneo na Barragem Principal.

A Figura 11 mostra os valores de resistividade da barragem. As zonas de baixa resistividade (ZBR – resistividade < 150 Ohm.m) ocorrem predominantemente nas porções superficiais da estrutura. As ZBR's são mais pontuais nos alinhamentos CE-01 e CE-02, enquanto no CE-03 e no CE-04 apresentam maior extensão e dispersão. Isso pode indicar que variações de compactação do maciço ou condições de maior umidade. As ZBR's mais extensas estão situadas na seção CE-04, executada na berma da El. 538,00 m, onde foram identificadas em campo as áreas com umidades, conforme mencionado anteriormente. A Figura 12 apresenta a seção CE-04 para ilustrar medições.

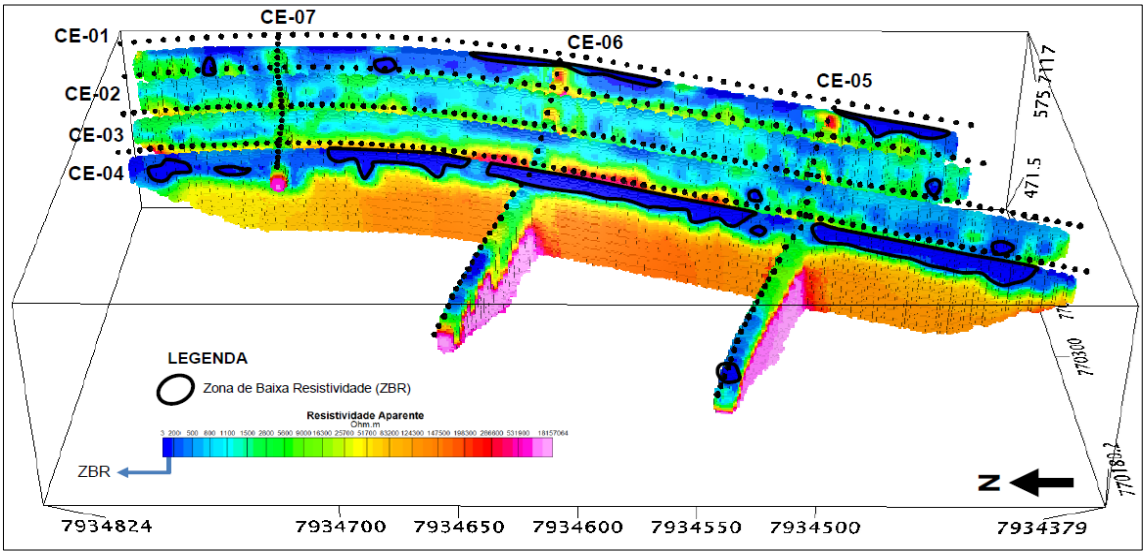


Figura 11 - Vista 3D dos valores de resistividade na Barragem Principal.

O comportamento geoelétrico revelado nas seções investigadas indicou que os valores reduzidos de resistividade na superfície do paramento de jusante estão

associados à presença de umidade proveniente de infiltração de água pluvial acumulada nos materiais de transição entre o maciço de terra da barragem e o enrocamento de proteção. Desta forma, a água acumulada nestes materiais granulares aparenta ser lentamente liberada de forma gravitacional, subdividindo-se em fluxos que percolam tanto no sentido descendente para o maciço de terra da barragem (infiltração através das transições) quanto no sentido da inclinação do talude para a berma inferior (ao longo das transições).

O padrão de resistividades característico do comportamento mencionado é apresentado na Figura 13, gerada no alinhamento correspondente à área onde foram observados os sinais de umidade na barragem, especificamente na berma de El. 538,00 m, na estaca 47. Verifica-se que nessa região os valores de resistividade obtidos foram inferiores a 150 Ohm.m, compatíveis com a presença de água, embora restritos às porções mais superficiais da seção.

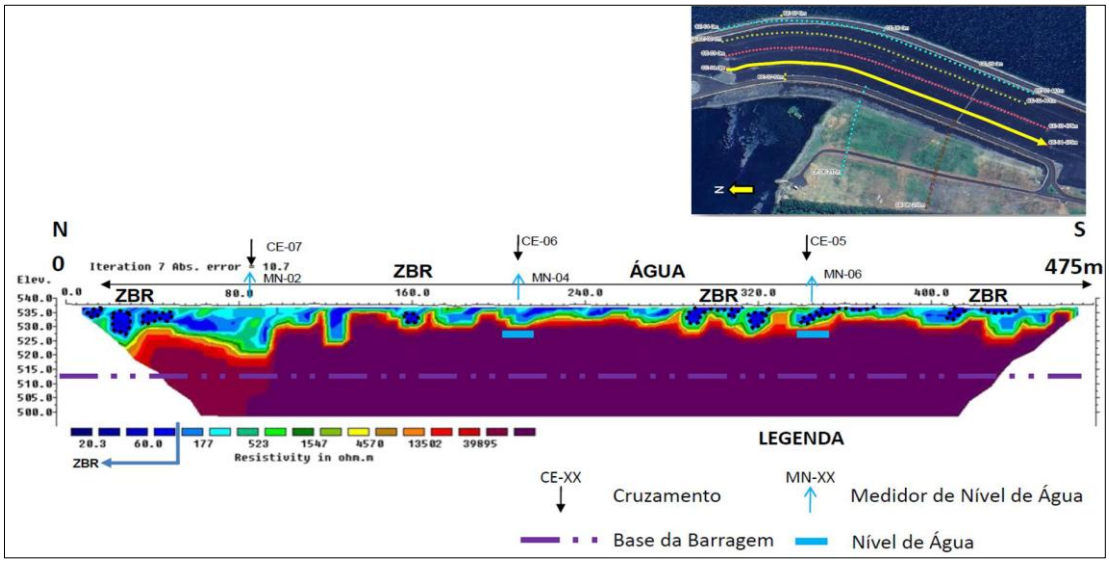


Figura 12 - Seção geofísica de resistividade – Caminhamento CE-04, destacado pela seta amarela na figura superior direita.

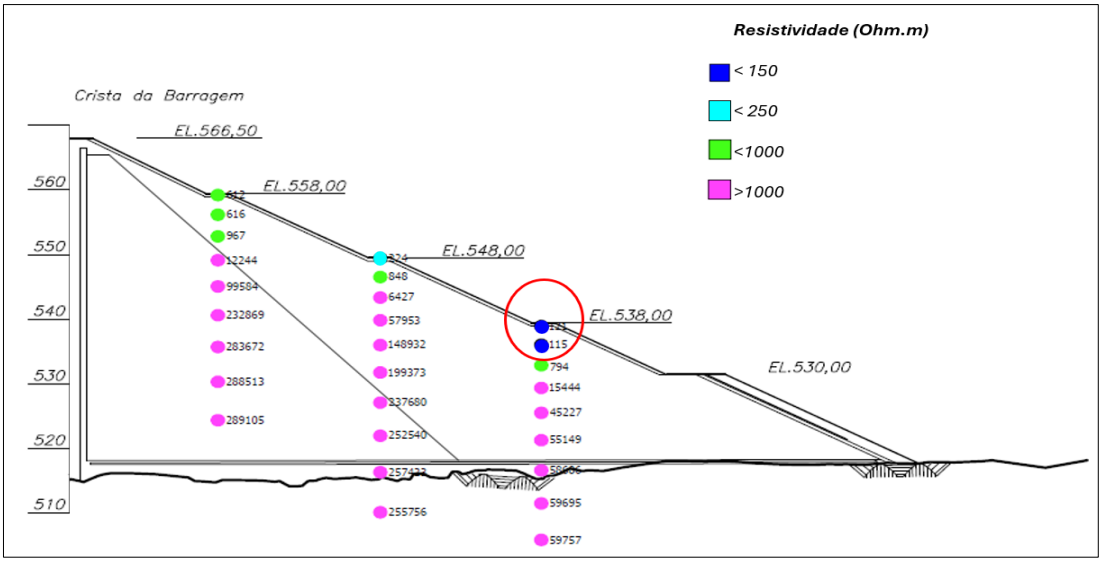


Figura 13 - Desenho esquemático dos valores de resistividades obtidos na seção Estaca 47+00 m.

5. DIAGNÓSTICO

O diagnóstico da causa da anomalia da presença de umidade na proximidade da estaca 47+0,00 m se deu a partir da integração da metodologia descrita, que envolveu discussões e estudos iniciais, ampliação da instrumentação e monitoramento e execução de campanha de sondagem geofísica.

Considerando-se que a investigação geofísica não indicou trajetórias de fluxo conectadas ao reservatório, nem sinais de percolação através do núcleo ou do filtro vertical e que as leituras dos instrumentos se mantiveram estáveis, próximas às cotas de fundo ou mesmo em condição seca, depreende-se que a umidade nas bermas não tinha origem no reservatório.

Além disso, os resultados apontaram que a ocorrência de umidade é restrita às camadas superficiais do maciço, proveniente de infiltração de água pluvial acumulada na transição entre o maciço de terra da barragem e o enrocamento de proteção. Tal fato pode ser explicado pela natureza do material utilizado na transição, que, ao contrário do que se espera, possui significativa capacidade de retenção de água, liberando-a lentamente de maneira gravitacional, tanto no sentido vertical quanto no sentido da inclinação do talude. Essa situação explica os registros de alguns instrumentos posicionados acima do tapete drenante, como no caso do MN-03, cujas leituras são concordantes com as elevações dos valores baixos de resistividade elétrica verificados por meio da geofísica realizada.

Nesse contexto, o diagnóstico concluiu que a causa-raiz da anomalia é o acúmulo de água pluvial na transição sob o enrocamento de proteção da barragem.

Após a conclusão do diagnóstico, questionou-se a necessidade de intervenções, tendo em vista a condição satisfatória de segurança da barragem. Nesse contexto, foram propostas pela consultoria contratada [6] algumas tratativas para avaliação:

- Execução de dispositivos de drenagem superficial (canaletas e descidas d'água) com o objetivo de ampliar a capacidade drenante do sistema de proteção superficial existente, atenuando a manifestação da anomalia.
- Substituição completa do sistema de proteção superficial da barragem por meio de remoção total do enrocamento e transição que revestem o talude de jusante da barragem, seguido de implantação de proteção vegetal do talude de jusante bem como de dispositivos de drenagem superficial.
- Continuidade do monitoramento da barragem por meio da instrumentação e inspeções com análises anuais do desempenho.

Considerando-se a natureza invasiva das duas primeiras intervenções propostas, que as medidas provavelmente não eliminam integralmente a ocorrência da umidade e que a segurança da barragem não é afetada, no primeiro momento, optou-se por dar continuidade ao monitoramento rotineiro da anomalia.

6. CONCLUSÃO

A partir do diagnóstico de causa-raiz e dos resultados obtidos nos estudos, concluiu-se que o comportamento do sistema de drenagem interna é compatível com o projeto e está em adequado funcionamento, garantindo a condução adequada das águas

percoladas e evitando poropressões indesejadas. Depreende-se, portanto, que a referida anomalia não afeta a estabilidade geotécnica dos taludes de jusante da barragem.

Deve-se ressaltar, no entanto, que o diagnóstico realizado retrata a condição atual da estrutura, com base nas informações disponíveis até o presente. Em caso de alterações, como aumento progressivo de cotas piezométricas e níveis d'água, torna-se indispensável a reavaliação do cenário, de forma a garantir a atualização das análises e conclusões.

Por fim, o presente estudo ressalta a efetividade da investigação geofísica como ferramenta complementar de diagnóstico, que se mostrou determinante para a validação das interpretações obtidas a partir da instrumentação. Além disso, o trabalho reforça a importância do monitoramento da instrumentação tradicional, como mecanismo capaz de auxiliar em diagnóstico de anomalias em estruturas geotécnicas.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Aliança Energia e ao Consórcio Capim Branco Energia pelo apoio e a todos os profissionais que participaram direta ou indiretamente na elaboração deste artigo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CB2-RS-19-001_R00_Relatório Inspeção Regular 2019

[2] Relatório Técnico - MICRA - Investigação de perfil mineral e reativo de águas de poços de instrumentação da UHE Amador Aguiar II para auxílio de identificação de provável origem

[3] W.002716.001-S-GG01-C-RV-002-00 - UHE Capim Branco II - Relatório de Inspeção de Segurança Regular 2025

[4] UHE AMADOR AGUIAR II - RELATÓRIO FINAL DO LEVANTAMENTO GEOFÍSICO DE ELETRORRESISTIVIDADE (Caminhamento Elétrico) e POTENCIAL ESPONTÂNEO (SP)

[5] LOKE, M.H., RUCKER, D.F., CHAMBERS, J.E., WILKINSON, P.B. & KURAS, O. 2020. Electrical resistivity surveys and data interpretation. In H. GUPTA et al. (eds), Encyclopedia of Solid Earth Geophysics (2nd ed.). Cham: Springer. Available at: https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/533865/1/Electrical%20resistivity%20surveys%20and%20data%20interpretation-2nd_ed_ver-2%20%28dfr%29.pdf (accessed 4 May 2026).

[6] DF24-C107-2-ENG-RTE-003 r00_Diagnóstico_relatório técnico



Cleber José de CARVALHO

Graduado em Engenharia Civil em 1988, especialização em Engenharia de Barragens 2001 (UFOP). Pela Cemig, participou da implantação de projetos como Nova Ponte, Miranda, Irapé, Porto Estrela, Queimados dentre outros. Coordenou o laboratório de solos da Cemig de 1997 a 2006. A partir de 2017, atua pela Aliança Energia S.A., proprietária de 7 UHEs: Igarapava, Amador Aguiar I e II, Funil, Aimorés, Porto Estrela e Risoleta Neves, na área de segurança de barragens.



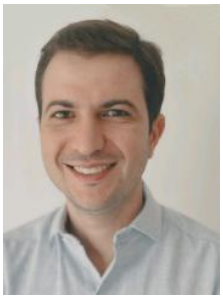
Leonardo Teixeira de AQUINO

Graduado em Engenharia Civil em 2006 pela UFV – Universidade Federal de Viçosa, MBA em Gerenciamento de Projetos em 2013 pela FGV e especialização em Engenharia e Tecnologia de Barragens em 2018 pela PUC Minas. Atua no monitoramento de estruturas civis e segurança de barragens e atua no desenvolvimento de projeto, implantação e manutenção civil de parques eólicos.



Ana Paula Borges MARCELINO

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (2008). Mestrado (2015) e Doutorado (2020) em engenharia de estruturas pela Universidade Federal de Minas Gerais. Desde 2021 trabalha como engenheira na Aliança Geração de Energia com atuação em estruturas civis, patologia das estruturas e segurança de barragem.



Cláudio Casagrande ROBERTO

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (2015), pós-graduado em Engenharia Geotécnica pela PUC-MG (2017) e pós-graduando em MBA em Gestão de Projetos pela USP/Esalq (2026). Possui experiência em engenharia de fundações e investigações geológico-geotécnicas. Atuou em projetos, consultoria e engenharia de registro associados à segurança geotécnica de barragens e pilhas de rejeitos de mineração. Desde 2025 trabalha na Aliança Geração de Energia na área de segurança de barragens.

	**Walter Luiz Alves de Oliveira JUNIOR** Graduado em Engenharia Civil em 2000 e especialização em Engenharia de Telecomunicações pela Universidade Federal de Uberlândia, Gestão de Projetos na Fundação Dom Cabral (FDC) – (2009-2010) e aperfeiçoamento em Gestão de Projetos no IBMEC (2010-2011). Participou da implantação de projetos como UHE Amador Aguiar I e II pelo CCBE, UHE Estreito, UHE Karebee, UHE Belo Monte e estudos de engenharia para implantação da AHE Santa Isabel, AHE Marabá e AHE São Luiz do Tapajós. Experiência de mais de 20 anos em prospecção, engenharia, implantação e O&M de projetos de energia renováveis (Hidráulica, Fotovoltaica, Biogás, eólica e Térmica a Biomassa). Atua desde 2022 como Gerente do CCBE Usinas Hidroelétricas de Amador Aguiar I e Amador Aguiar II.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.4
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

VALIDAÇÃO CRUZADA ENTRE DADOS INSAR E MEDIÇÕES GEODÉSICAS NA DETECÇÃO DE DEFORMAÇÕES EM BARRAGENS

Maria Luiza FAVARÃO VIEIRA
Engenheira Civil - Elera Renováveis

Ewerton FERREIRA CRUZ
Engenheiro Ambiental – CSN Mineração

Iara FERNANDES MOREIRA
Engenheira de Minas - CSN Mineração

Laura HONÓRIO DE OLIVEIRA SILVA
Engenheira Ambiental - CSN Mineração

RESUMO

O estudo compara o monitoramento de deslocamentos superficiais em barragens de terra por marcos superficiais e técnicas InSAR. Enquanto os marcos fornecem medições pontuais de alta precisão, o InSAR oferece cobertura espacial ampla e séries temporais contínuas. A integração entre os métodos enfrenta desafios relacionados a ruídos ambientais, vegetação, umidade e diferenças metodológicas. A pesquisa propõe validação cruzada, calibração recíproca e filtragem inteligente de dados para aumentar a confiabilidade das análises. Foram comparados deslocamentos medidos em campo com deformações detectadas pelas plataformas Sentinel-1, ICEYE e PAZ. A relação entre os conjuntos de dados foi avaliada por métricas estatísticas, como RMSE e coeficiente de determinação (R^2), além de análises espectrais para identificação de padrões sazonais. Também foram aplicados filtros espaciais e temporais, incluindo filtros de coerência, clusterização e exclusão de pixels afetados por vegetação. A análise integrada permitiu classificar setores da barragem quanto à confiabilidade das medições orbitais e identificar automaticamente artefatos e ruídos InSAR. Os resultados indicam maior consistência entre medições pontuais e distribuídas, além de melhor compreensão espacial das deformações superficiais. Conclui-se que a integração entre marcos superficiais e InSAR fortalece o monitoramento de barragens, ampliando a segurança operacional, a redundância de informações e a capacidade de detecção precoce de anomalias estruturais.

ABSTRACT

The study compares the monitoring of surface displacements in earth dams using surface benchmarks and InSAR techniques. While benchmarks provide highly accurate point measurements, InSAR offers wide spatial coverage and continuous time series. The integration of these methods faces challenges related to environmental noise, vegetation, moisture, and methodological differences. The research proposes cross-validation, reciprocal calibration, and intelligent data filtering to increase the reliability of the analyses. Field-measured displacements were compared with deformations detected by the Sentinel-1, ICEYE, and PAZ platforms. The relationship between the datasets was evaluated using statistical metrics such as RMSE and the coefficient of determination (R^2), as well as spectral analyses to identify seasonal patterns. Spatial and temporal filters were also applied, including coherence filters, clustering, and the exclusion of pixels affected by vegetation. The integrated analysis enabled the classification of dam sectors according to the reliability of orbital measurements and the automatic identification of InSAR artifacts and noise. The results indicate greater consistency between point-based and distributed measurements, as well as an improved spatial understanding of surface deformations. It is concluded that the integration of surface benchmarks and InSAR strengthens dam monitoring by enhancing operational safety, information redundancy, and the early detection capability of structural anomalies.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de barragens constitui um dos principais pilares da segurança geotécnica e estrutural dessas obras, sendo fundamental para avaliação do comportamento do maciço, identificação de anomalias e prevenção de falhas estruturais [1]. Em barragens de rejeitos, especialmente aquelas alteadas pelo método à montante, o acompanhamento contínuo das deformações superficiais torna-se ainda mais relevante devido à complexidade geotécnica associada às etapas sucessivas de alteamento, às variações das condições hidráulicas e à elevada sensibilidade da estrutura às alterações de carregamento e drenagem [7][8].

As deformações representam importantes indicadores do comportamento mecânico da barragem, podendo evidenciar processos de recalque, deslocamentos diferenciais, perda de resistência, adensamento e potenciais mecanismos de instabilidade. Dessa forma, o monitoramento deformacional permite identificar alterações no comportamento estrutural em estágio inicial, subsidiando análises de estabilidade, avaliações de risco e tomada de decisão preventiva [6][7]. A instrumentação geotécnica desempenha papel essencial na inspeção e avaliação da segurança de barragens, possibilitando a obtenção de dados quantitativos que auxiliam na interpretação do desempenho estrutural ao longo da vida útil da barragem [6].

No Brasil, a obrigatoriedade do monitoramento e da instrumentação de barragens está estabelecida na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010 [2], posteriormente alterada pela Lei nº 14.066/2020 [3], que reforçou os requisitos relacionados à gestão de risco, monitoramento contínuo, inspeções regulares e adoção de medidas preventivas para redução da probabilidade de acidentes. A legislação determina que os empreendedores implementem sistemas permanentes de acompanhamento das condições de estabilidade das estruturas, garantindo controle operacional e segurança das barragens.

Além disso, a Agência Nacional de Mineração (ANM), por meio da Resolução ANM nº 95/2022 [4], estabelece diretrizes relacionadas à segurança de barragens de mineração, reforçando a necessidade de monitoramento geotécnico contínuo, instrumentação adequada e acompanhamento sistemático do comportamento estrutural das barragens, especialmente aquelas construídas ou alteadas pelo método à montante. Complementarmente, a Resolução nº 143/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) [5] estabelece critérios gerais de classificação de barragens quanto ao risco e ao dano potencial associado, reforçando a necessidade de sistemas de monitoramento compatíveis com a criticidade da estrutura.

Tradicionalmente, o monitoramento de deformações em barragens é realizado por meio de instrumentação geotécnica e levantamentos geodésicos, destacando-se os marcos superficiais como uma das técnicas mais consolidadas para avaliação de deslocamentos superficiais. Esses instrumentos fornecem medições pontuais de elevada precisão, permitindo acompanhar o comportamento deformacional da estrutura ao longo do tempo [6]. Com os avanços tecnológicos, sistemas automatizados passaram a ampliar significativamente a capacidade de monitoramento, permitindo leituras em alta frequência e maior confiabilidade operacional.

A barragem objeto deste estudo consiste em uma barragem de rejeitos alteada pelo método à montante, dotada de sistema integrado de monitoramento deformacional composto por marcos superficiais automatizados, monitorados por estação robótica com leituras realizadas a cada 15 minutos, além de monitoramento remoto por meio da técnica de Interferometria por Radar de Abertura Sintética (InSAR – Interferometric Synthetic Aperture Radar). A utilização conjunta dessas metodologias possibilita integrar medições geodésicas de elevada precisão com dados orbitais de ampla cobertura espacial, ampliando a capacidade de avaliação do comportamento deformacional da estrutura.

Nos últimos anos, a tecnologia InSAR vem sendo amplamente aplicada no monitoramento geotécnico devido à sua capacidade de detectar deslocamentos milimétricos em grandes áreas, por meio da análise interferométrica de imagens de radar adquiridas por satélites [9][10]. O InSAR apresenta vantagens importantes relacionadas à cobertura espacial contínua, análise multitemporal e capacidade de identificação de padrões deformacionais distribuídos ao longo da estrutura. Entretanto, apesar de suas vantagens, fatores como vegetação, variações de umidade, rugosidade superficial e perda de coerência interferométrica podem introduzir ruídos e inconsistências nos dados orbitais, tornando necessária a validação das informações com dados obtidos em campo.

Nesse contexto, a integração entre dados InSAR e medições geodésicas obtidas por marcos superficiais apresenta elevado potencial para fortalecimento dos sistemas de monitoramento geotécnico, permitindo maior robustez na interpretação das deformações superficiais, aumento da confiabilidade das análises e aprimoramento da segurança operacional da barragem.

Dessa forma, este artigo tem como objetivo realizar uma análise comparativa e de validação cruzada entre dados InSAR e medições geodésicas provenientes de marcos superficiais automatizados em uma barragem de rejeitos alteada pelo método à montante, buscando avaliar a consistência, confiabilidade e complementaridade entre as técnicas aplicadas ao monitoramento de deformações superficiais.

2 METODOLOGIA

A comparação entre os dados obtidos por marcos superficiais e pelas técnicas InSAR foi conduzida a partir de uma abordagem integrada, buscando compatibilizar não apenas as grandezas medidas, mas também as diferenças intrínsecas entre os dois métodos de aquisição.

Inicialmente, realizou-se o tratamento e organização das séries temporais provenientes dos instrumentos MS-02 e MS-04 e dos pixels InSAR associados a cada marco. As bases de dados apresentavam diferenças importantes em termos de frequência de aquisição e regularidade: enquanto os marcos superficiais fornecem leituras praticamente contínuas e diárias, os dados InSAR apresentam descontinuidades temporais associadas aos ciclos orbitais dos satélites e à perda de coerência interferométrica em determinadas condições ambientais [10][11].

Dessa forma, tornou-se necessário realizar uma etapa de sincronização temporal dos dados. Para isso, as séries foram reamostradas em uma base temporal comum, sendo

adotada interpolação linear para preencher lacunas nas medições InSAR, sempre preservando a tendência original dos dados. Essa etapa foi fundamental para garantir comparabilidade direta entre os conjuntos.

No que se refere à associação espacial, foram considerados, para cada instrumento, múltiplos pixels InSAR localizados nas proximidades do ponto monitorado. No que se refere à associação espacial, foram considerados, para cada instrumento, os pixels InSAR localizados nas proximidades do ponto monitorado. Para cada marco superficial, foram selecionados os pixels disponíveis dentro da vizinhança imediata do instrumento, buscando garantir representatividade espacial e minimizar os efeitos de heterogeneidades locais. Além da análise individual dos pixels, foi calculada a média dos deslocamentos observados para o conjunto selecionado, permitindo avaliar o comportamento médio da área monitorada e reduzir a influência de ruídos pontuais associados à perda de coerência interferométrica, variações de cobertura superficial e efeitos geométricos inerentes ao processamento InSAR [10][12].

Uma etapa particularmente importante foi a compatibilização das grandezas medidas. Embora o InSAR registre deslocamentos na direção da linha de visada (LOS), os dados utilizados já estavam decompostos em componentes verticais e horizontais [13], permitindo a comparação direta com os deslocamentos medidos pelos marcos superficiais. A análise foi conduzida separadamente para cada componente, visto que a sensibilidade do InSAR varia significativamente entre elas.

Para quantificar o grau de concordância entre as séries, foram utilizadas métricas estatísticas clássicas, como o erro médio quadrático (RMSE), que avalia a discrepância absoluta entre os dados, e o coeficiente de determinação (R^2), que permite verificar o grau de correlação entre as tendências observadas [14].

Complementarmente, para reduzir a subjetividade da comparação entre as metodologias, foi realizada uma análise quantitativa baseada na comparação ponto a ponto das séries temporais sincronizadas. Para cada marco superficial e respectivo conjunto de pixels InSAR, foram calculados o coeficiente de correlação de Pearson (r), o coeficiente de determinação (R^2), o erro médio absoluto (MAE) e o erro médio quadrático (RMSE). Também foi avaliada a capacidade do InSAR em reproduzir a tendência observada nos marcos por meio da comparação entre as inclinações das retas de regressão linear ajustadas às séries temporais. Dessa forma, a concordância entre os métodos foi analisada considerando simultaneamente a correlação temporal, a similaridade das tendências e a magnitude dos desvios observados. Adicionalmente, empregou-se a análise de correlação cruzada (cross-correlation) para verificar a existência de eventuais defasagens temporais entre os sinais e identificar o deslocamento temporal capaz de maximizar a correlação entre as séries. Essa abordagem permitiu avaliar objetivamente não apenas a proximidade entre os valores medidos, mas também a capacidade dos dados InSAR de reproduzir o comportamento deformacional registrado pelos marcos superficiais ao longo do período de monitoramento.

Por fim, foi implementada uma etapa de filtragem de ruído, fundamental para o uso adequado dos dados InSAR. Foram descartados pixels com comportamento claramente inconsistente, caracterizados por variações abruptas, valores extremos ou forte divergência em relação à tendência observada nos instrumentos. Também foram considerados fatores ambientais conhecidos por afetar a qualidade do sinal

interferométrico, como crescimento de vegetação, variações de umidade e mudanças na rugosidade superficial [10][11][12].

3 RESULTADOS

A análise integrada das séries temporais revelou diferenças significativas entre o comportamento dos deslocamentos medidos pelos marcos superficiais e aqueles estimados pelo InSAR, tanto em termos de magnitude quanto de consistência temporal.

Para o instrumento MS-02, o comportamento dos deslocamentos foi mais estável, com predominância de valores positivos e menor amplitude de variação, tipicamente entre aproximadamente 0,20 cm e 0,45 cm. Esse padrão mais regular resultou em melhor concordância qualitativa com os dados InSAR, embora ainda se observe dispersão entre os pixels e presença de variações não reproduzidas pelos instrumentos. A menor amplitude dos deslocamentos neste ponto contribuiu para uma redução do erro absoluto, evidenciando maior compatibilidade relativa entre os métodos.

A figura 1 e 2 apresentam os deslocamentos superficiais utilizados para a análise de dados para o instrumento MS-02

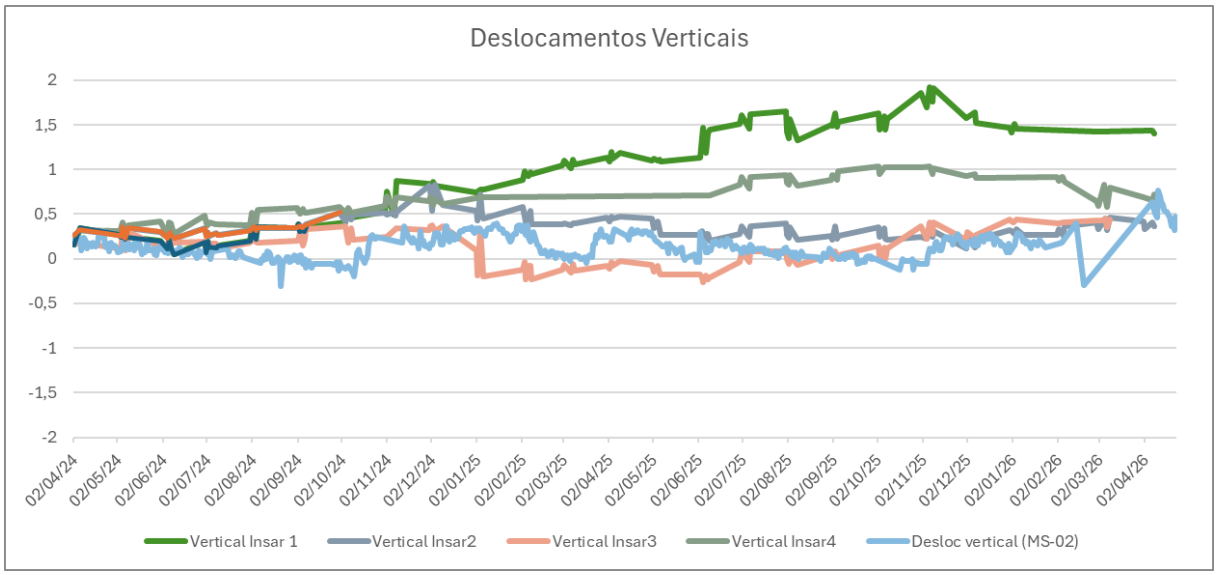


Figura 1 – Série temporal dos deslocamentos verticais na região do instrumento MS-02, comparando as medições do marco superficial com os deslocamentos estimados por interferometria radar por satélite (InSAR).

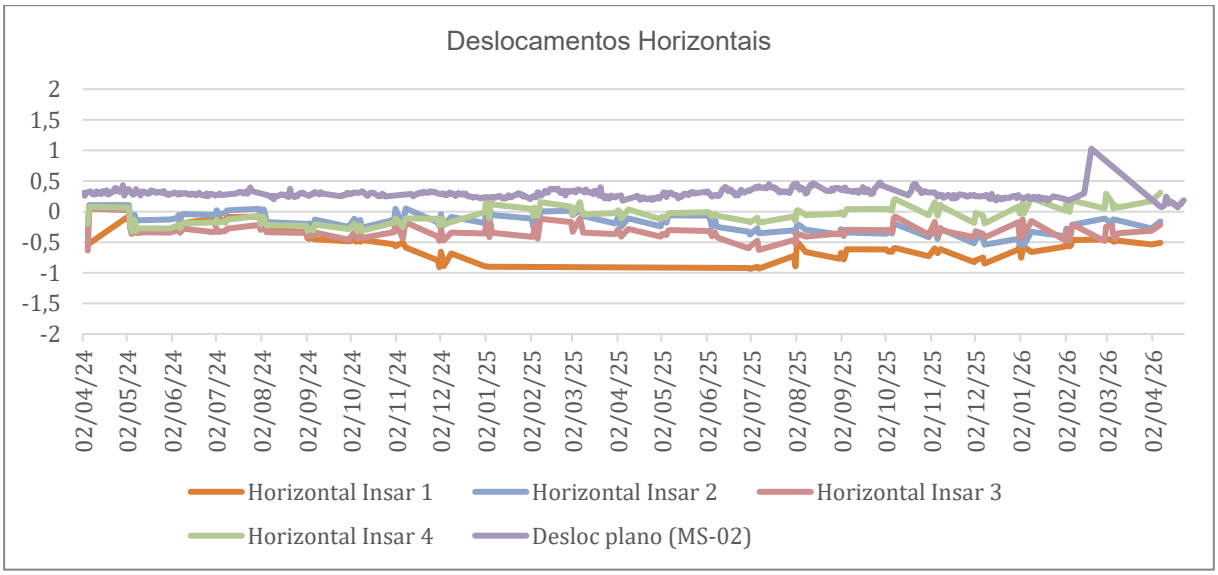


Figura 2 – Série temporal dos deslocamentos horizontais na região do instrumento MS-02, comparando as medições do marco superficial com os deslocamentos estimados por interferometria radar por satélite (InSAR).

No caso do instrumento MS-04, observou-se um padrão de recalque bem definido ao longo do período analisado, com deslocamentos verticais variando aproximadamente entre -1,06 cm e -0,15 cm, indicando um comportamento progressivo seguido de relativa estabilização em fases posteriores. Em contraste, os dados InSAR associados a esse instrumento apresentaram elevada dispersão entre os diferentes pixels, com valores variando tanto em magnitude quanto em sinal ao longo do tempo. Em diversos períodos, foram identificadas inversões de sinal entre pixels próximos, com valores simultaneamente positivos e negativos, o que indica a presença de ruídos e limitações na capacidade do InSAR de representar fielmente deslocamentos verticais absolutos em ambientes com baixa coerência interferométrica.

A menor concordância observada para os deslocamentos verticais é compatível com limitações amplamente reconhecidas na literatura para esse tipo de componente. Como as medições InSAR são originalmente adquiridas na direção da linha de visada do satélite (LOS), a estimativa dos deslocamentos verticais depende de etapas adicionais de decomposição, que podem aumentar a propagação de incertezas presentes no sinal original. Adicionalmente, fatores como perda de coerência interferométrica, variações de umidade, crescimento de vegetação e alterações na rugosidade superficial podem afetar a qualidade das medições, contribuindo para o aumento da dispersão observada entre os pixels analisados e para a redução da concordância com os dados obtidos pelos marcos superficiais [10][13].

As figuras 3 e 4 apresentam os deslocamentos superficiais utilizados para a análise de dados para o instrumento MS-04.

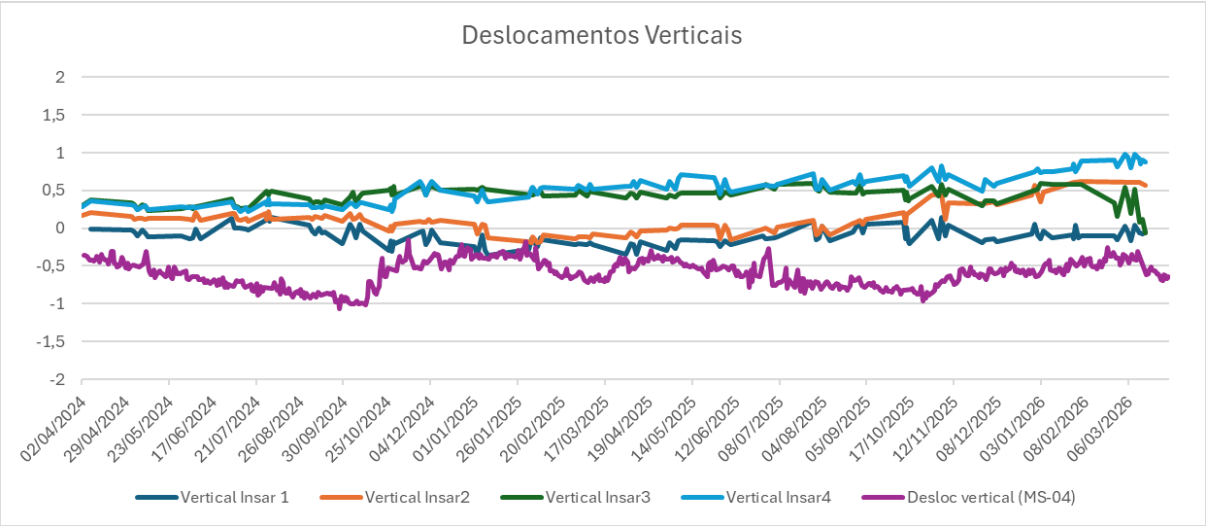


Figura 3 – Série temporal dos deslocamentos verticais na região do instrumento MS-04, comparando as medições do marco superficial com os deslocamentos estimados por interferometria radar por satélite (InSAR).

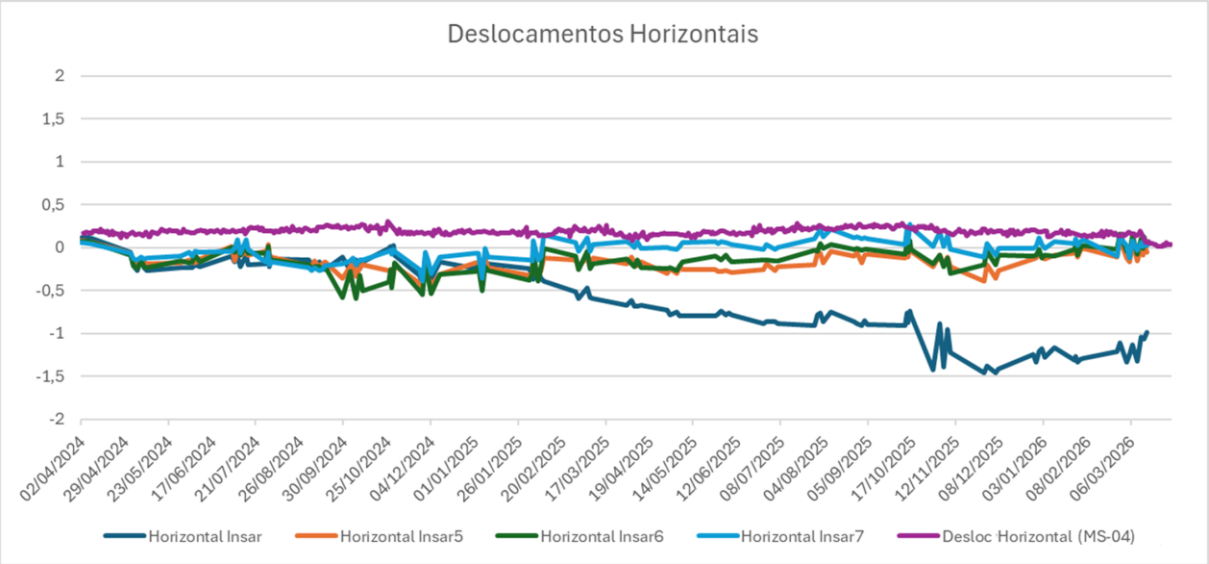


Figura 4 – Série temporal dos deslocamentos horizontais na região do instrumento MS-04, comparando as medições do marco superficial com os deslocamentos estimados por interferometria radar por satélite (InSAR).

A análise dos deslocamentos horizontais indicou, de modo geral, melhor correspondência entre as duas técnicas quando comparada ao comportamento observado no componente vertical. Apesar da presença de ruído nos dados InSAR, as tendências predominantes foram, em muitos casos, consistentes com as medições dos marcos superficiais, especialmente no que se refere à direção do movimento. No entanto, oscilações de alta frequência e variações abruptas permaneceram presentes, evidenciando limitações associadas à resolução espacial e à coerência dos alvos.

Do ponto de vista estatístico, a relação entre os conjuntos de dados pode ser classificada como de correlação moderada a baixa, dependendo do instrumento analisado. Para o MS-02, a correlação foi relativamente mais elevada, refletindo a

maior estabilidade, enquanto para o MS-04 a divergência entre as séries resultou em menores níveis de correlação. O erro médio quadrático apresentou ordem de grandeza entre 0,2 e 0,5 cm para o deslocamento vertical e entre 0,1 e 0,3 cm para o deslocamento horizontal, evidenciando discrepâncias relevantes entre os métodos, especialmente no componente vertical.

A avaliação quantitativa da concordância entre os dados InSAR e os marcos superficiais foi realizada por meio dos indicadores RMSE e R^2, calculados para cada instrumento e componente de deslocamento, conforme demonstrado na Tabela 1. Destaca-se que esses valores são médios considerando os pixels analisados.

Tabela 1 – Indicadores estatísticos da comparação entre marcos superficiais e dados InSAR

Instrumento	Componente	R^2	RMSE (cm)
MS-02	Horizontal	0,63	0,12
MS-02	Vertical	0,43	0,24
MS-04	Horizontal	0,37	0,22
MS-04	Vertical	0,18	0,43

Os resultados indicam melhor desempenho da técnica InSAR para os deslocamentos horizontais, que apresentaram menores valores de RMSE e maiores coeficientes de determinação. Para os deslocamentos verticais observou-se aumento da dispersão e redução da capacidade de reprodução das tendências medidas pelos marcos superficiais, comportamento compatível com as limitações associadas à decomposição das medidas de linha de visada (LOS) em componentes verticais e horizontais.

A avaliação da variabilidade espacial dos pixels InSAR revelou diferenças significativas dentro de áreas muito próximas, o que reforça a necessidade de aplicação de critérios rigorosos de filtragem. Alguns pixels apresentaram comportamento coerente ao longo do tempo, sendo potencialmente associados a alvos estáveis e adequados para monitoramento. Por outro lado, diversos pontos apresentaram comportamento errático, caracterizado por oscilações abruptas e ausência de continuidade temporal, indicando baixa confiabilidade.

Os resultados também evidenciam a forte influência de fatores ambientais sobre os dados InSAR. Variações de umidade, crescimento de vegetação e alterações na rugosidade superficial contribuem para a perda de coerência interferométrica, resultando em ruídos e inconsistências nas medições. Esses efeitos são particularmente relevantes em barragens de terra, onde a heterogeneidade superficial é elevada.

De forma geral, verifica-se que o InSAR apresenta elevado potencial para análise espacial e identificação de padrões de deformação distribuídos, porém sua aplicação para monitoramento quantitativo exige calibração cuidadosa e validação com dados de campo. Por sua vez, os marcos superficiais demonstram alta confiabilidade e precisão pontual, sendo essenciais como referência para a interpretação dos dados orbitais.

A integração entre as duas técnicas mostrou-se fundamental para a robustez do monitoramento. Enquanto os marcos fornecem medições precisas e estáveis, o InSAR amplia a capacidade de análise ao oferecer visão espacial contínua do comportamento da estrutura. Dessa forma, a combinação dos métodos permite reduzir incertezas, identificar ruídos e aprimorar a interpretação dos deslocamentos superficiais, contribuindo para um monitoramento mais seguro e eficaz de barragens de terra.

4 CONCLUSÕES

A análise comparativa entre os dados obtidos por marcos superficiais e medições derivadas de técnicas InSAR demonstrou que, embora existam diferenças significativas em termos de precisão pontual e consistência temporal, ambas as abordagens são complementares e, quando integradas, proporcionam um sistema de monitoramento mais robusto e abrangente.

Os marcos superficiais evidenciaram elevada confiabilidade e estabilidade, sendo capazes de fornecer medições precisas e contínuas dos deslocamentos, especialmente no componente vertical, onde as variações observadas apresentam coerência física e baixa dispersão. Por outro lado, os dados InSAR mostraram maior sensibilidade a ruídos e variabilidade espacial, especialmente em decorrência de fatores ambientais como vegetação, umidade e características superficiais do terreno.

Apesar dessas limitações, os resultados confirmam que o InSAR é uma ferramenta extremamente valiosa para o monitoramento de barragens de terra. Sua principal vantagem reside na capacidade de fornecer cobertura espacial ampla e contínua, permitindo a identificação de padrões de deformação distribuídos ao longo de toda a estrutura, o que não é possível por meio de instrumentação pontual. Além disso, a análise multitemporal do InSAR possibilita detectar tendências de deslocamento e potenciais anomalias em estágio inicial, contribuindo para a antecipação de problemas estruturais.

Quando associado a critérios adequados de filtragem, seleção de pixels confiáveis e calibração com dados de campo, o InSAR apresenta desempenho consistente na representação das tendências de deformação, especialmente no componente horizontal e em áreas com boa coerência interferométrica. Nesse contexto, os marcos superficiais desempenham papel fundamental como referência de validação, garantindo maior confiabilidade na interpretação dos resultados orbitais.

Dessa forma, conclui-se que o InSAR não deve ser visto como um substituto da instrumentação convencional, mas sim como um poderoso complemento. A integração entre essas técnicas permite combinar a precisão local dos marcos superficiais com a abrangência espacial do InSAR, resultando em um sistema de monitoramento mais completo, redundante e eficiente. Essa abordagem integrada representa um avanço significativo na engenharia de barragens, ampliando a capacidade de diagnóstico, aumentando a segurança operacional e aprimorando a gestão de riscos associados a deformações superficiais.

5 PALAVRAS-CHAVE

Análise de Deformações; Análise Temporal; Interferometria Radar; Monitoramento geotécnico; Deslocamentos Superficiais

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). (2024) – “Relatório de Segurança de Barragens 2024”, Brasília, DF.

[2] BRASIL. (2010) – “Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens”, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF.

[3] BRASIL. (2020) – “Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 2010, para dispor sobre segurança de barragens”, Diário Oficial da União, Brasília, DF.

[4] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). (2022) – “Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022”, Diário Oficial da União, Brasília, DF.

[5] CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH). (2012) – “Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e volume”, Diário Oficial da União, Brasília, DF.

[6] DUNNICLIFF, J. (1993) – “Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance”, John Wiley & Sons, New York.

[7] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). (2012) – “Dam Surveillance Guide”, Bulletin 158, Paris.

[8] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). (2020) – “Tailings Dam Safety Bulletin”, Paris.

[9] FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. (2001) – “Permanent Scatterers in SAR Interferometry”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 39, n. 1, p. 8–20.

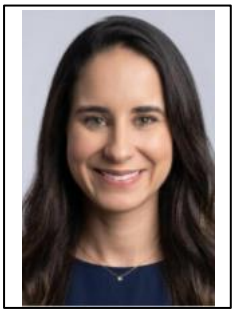
[10] MASSONNET, D.; FEIGL, K. L. (1998) – “Radar interferometry and its application to changes in the Earth’s surface”, Reviews of Geophysics, v. 36, n. 4, p. 441–500.

[11] FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. (2001) – “Permanent Scatterers in SAR Interferometry”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 39, n. 1, p. 8–20.

[12] HOOPER, A.; ZEBKER, H.; SEGALL, P.; KAMPES, B. (2004) – “A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers”, Geophysical Research Letters, v. 31, n. 23.

[13] HANSSEN, R. F. (2001) – “Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

[14] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. (2014) – “Applied Statistics and Probability for Engineers”, 6. ed., John Wiley & Sons, New York.

	**Maria Luiza FAVARÃO VIEIRA** Engenheira civil formada pela UNESP e pós-graduada pela PUC-Minas em Geotecnia, com atuação em segurança de barragens, análises de estabilidade, monitoramento geotécnico e gestão de riscos, com experiência em elaboração de relatórios para suporte à tomada de decisão.
	**Ewerton FERREIRA CRUZ** Engenheiro Ambiental (Newton Paiva, 2015), Mestre (2018) e Doutor (2022) em Geografia – Tratamento da Informação Espacial pela PUC Minas. Especialista em Engenharia Geotécnica (Única, 2023) e em Recursos Hídricos Aplicados à Mineração (Focus, 2026). Atua em Segurança de Barragens, com experiência em PAEBM, PSB, geoprocessamento, manutenção de barramentos e gestão de riscos.
	**Iara FERNANDES MOREIRA** Engenheira de Minas formada pelo CEFET e pós-graduada pelo Instituto Minere em Geotecnia e Segurança de Barragens e Pilhas de Mineração, com experiência em monitoramento de estruturas, estabilidade de taludes, gestão e gerenciamento de riscos geotécnicos.
	**Laura HONÓRIO DE OLIVEIRA SILVA** Engenheira Ambiental e Sanitarista (UFAL, 2018). Mestre em Engenharia Geotécnica (UNB, 2023). Especialista em Engenharia de Estruturas Hidráulicas (Unyleya, 2026). Atuação em segurança de barragens, com experiência em projetos de drenagem superficial de barragens e pilhas, dimensionamento de estruturas hidráulicas, estudos de ruptura hipotética e modelagem hidrológica.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.3
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

VALORES DE CONTROLE ESTATÍSTICOS PARA PIEZÔMETROS COM VARIAÇÕES SAZONAIS NAS MEDIDAS

Deborah Cardoso da CRUZ
Engenheira de Produção Civil MSc. - Enemax Engenharia e Consultoria Ltda.

Teresa Cristina FUSARO
Engenheira Civil MSc. - Fusaro Engenharia e Consultoria Ltda.

Eric Silveira NUNES
Engenheiro Civil - Enemax Engenharia e Consultoria Ltda.

Túlio Marcos de VASCONCELLOS Filho
Engenheiro Civil – Enemax Engenharia e Consultoria Ltda.

Prof. Dr. Roberto da Costa QUININO
Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

A definição de valores de controle para a instrumentação é essencial no acompanhamento da segurança de barragens, permitindo a avaliação das grandezas monitoradas frente às premissas de projeto e o seu desempenho ao longo do tempo. Quando estabelecidos a partir de modelos matemáticos, são usualmente referidos como valores de controle determinísticos. Contudo, tal metodologia leva a valores-limite fixos, não permitindo correlacionar as grandezas monitoradas a grandezas-causa (variáveis explicativas) que tenham variações sazonais, como, por exemplo, ao nível do reservatório ou ao nível de jusante.

Nesse contexto, o uso de metodologias estatísticas para o estabelecimento dos valores de controle permite a avaliação de grandezas monitoradas considerando o seu histórico de medidas, sendo especialmente adequadas na fase de operação da barragem.

O presente trabalho ajusta um modelo de regressão linear múltipla à série histórica de piezômetros que respondem às variações de nível de montante e/ou de jusante. Os intervalos de previsão são validados utilizando a técnica de reamostragem *bootstrap* não paramétrico, em que são realizadas inferências por meio de reamostras com reposição obtidas da amostra original. Essa metodologia permite avaliar a utilização dos modelos de regressão, mesmo quando não atendidas as condições de normalidade e homocedasticidade dos resíduos.

Os intervalos de previsão assim definidos permitem estipular faixas dentro das quais as medidas são esperadas e obter alertas sobre a alteração de comportamento de um instrumento, mas que não impliquem necessariamente em uma situação limite

de operação. Desta forma, auxiliam na detecção precoce de tendências adversas que possam sugerir anomalias na estrutura da barragem e podem compor um sistema de análise automática de dados da instrumentação.

ABSTRACT

Defining threshold limits (control values) for instrumentation is essential in dam safety monitoring, to evaluate monitored parameters against design assumptions and their performance over time. When obtained from mathematical models, they are usually referred to as deterministic control values. However, this methodology leads to fixed limit values, not allowing the correlation of monitored quantities with causal parameters (explanatory variables) that have seasonal variations, such as reservoir or downstream levels.

In this context, the use of statistical methodologies to establish control values allows the evaluation of monitored quantities considering their time history, being especially suitable in the dam's operational phase.

This work fits a multiple linear regression model to the historical series of piezometers that respond to variations in upstream and/or downstream levels. Prediction intervals are validated using the non-parametric bootstrap resampling technique, in which inferences are made through resampling with replacement obtained from the original sample. This methodology allows evaluating the use of regression models, even when the conditions of normality and homoscedasticity of the residuals are not met.

The prediction intervals thus defined allow establishing ranges within which measurements are expected and obtaining alerts about changes in the behavior of an instrument, but which do not necessarily imply a limit situation of operation. In this way, they assist in the early detection of adverse trends that may suggest anomalies in the dam structure and can form part of an automatic data analysis system for instrumentation.

1. INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas de engenharia complexas, cuja concepção, construção e operação envolvem incertezas geológicas, geotécnicas, hidrológicas, além de processos de envelhecimento dos materiais, demandando monitoramento ao longo de sua vida útil, para assegurar que não ocorram desvios em relação às intenções de projeto e comprometimento do seu desempenho estrutural. Para tal, a abordagem tradicional da engenharia é pautada em análises estruturais empregando modelos determinísticos, inspeção visual e instrumentação.

Dentre as metodologias citadas, pode ser destacada a instrumentação de barragens, cuja análise dos dados, complementada com técnicas estatísticas e de modelagem de dados, configura uma estratégia importante para elevar a acurácia e a eficácia do monitoramento. Estas técnicas possibilitam o estabelecimento de faixas de valores esperados para os parâmetros medidos por cada instrumento, de forma que os dados

coletados ganhem “significado” assim que registrados e permitam a identificação precoce de desvios no comportamento das estruturas.

Estes valores, usualmente denominados “valores de controle” ou “valores limite” (*threshold limits*), podem ser estabelecidos por meio de modelos matemáticos e da verificação do atendimento a critérios de projeto, bem como utilizando técnicas estatísticas, que buscam verificar se as medidas de determinado instrumento são compatíveis com as observadas em barragens semelhantes ou se apresentam estabilidade na resposta aos carregamentos ao longo do tempo.

A análise de regressão tem sido a técnica estatística mais empregada para esta finalidade, pela sua simplicidade e adequação na avaliação de parâmetros que apresentam sazonalidade, acompanhando variações sazonais das grandezas-causa, tais como variações nos níveis de montante e de jusante.

Neste método, a estimação dos parâmetros do modelo requer a suposição de que os resíduos sejam variáveis aleatórias não correlacionadas, com média zero e variância constante, bem como os testes de hipóteses e estimação do intervalo de confiança ou de previsão requerem que os resíduos sejam normalmente distribuídos, dentre outros pressupostos. No entanto, muitas vezes estes pressupostos não podem ser assumidos.

Nesse contexto, o presente trabalho ajusta um modelo de regressão linear múltipla à série histórica de piezômetros instalados em barragem de aterro e valida os intervalos de previsão utilizando a técnica de reamostragem *bootstrap* não paramétrico, em que são realizadas inferências por meio de reamostras com reposição obtidas da amostra original. A quantificação da incerteza é feita calculando o erro padrão e o intervalo de confiança dos parâmetros desconhecidos, sem a necessidade de assumir tais pressupostos.

O objetivo final é estipular faixas ou limites dentro dos quais as medidas são esperadas, o que permite a detecção precoce de tendências adversas que possam sugerir anomalias na estrutura da barragem.

2. VALORES DE CONTROLE PARA A INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

2.1 Conceitos gerais

O estabelecimento de valores de controle para a instrumentação de barragens tem como finalidade estipular faixas ou limites dentro dos quais as medidas são esperadas, de forma a permitir o diagnóstico precoce de tendências adversas que possam sugerir o desenvolvimento de um eventual modo de falha. Representam tipicamente valores que refletem as premissas de projeto ou que indiquem alteração no padrão histórico de medidas [1].

Estes têm sido denominados “valores de controle determinísticos” quando obtidos por meio de modelos matemáticos ou quando associados a critérios de projeto, e são importantes na avaliação do estado de segurança de uma estrutura e no seu controle ao longo do tempo, pois explicitam a concepção, as premissas e os objetivos do projeto. No entanto, tais modelos possuem limitações (conhecimento limitado das

propriedades tensão-deformação e de permeabilidade dos materiais e da fundação, por exemplo) e estão dissociados de variações sazonais dos carregamentos de reservatório, temperatura e pluviometria.

Desta forma, o comportamento das barragens e suas fundações deve ser continuamente confrontado com as previsões dos modelos, buscando compreender eventuais causas de desvio, verificar a necessidade de ajustes nos modelos e avaliar se o comportamento observado corresponde a uma condição satisfatória de segurança. Contudo, quando os modelos matemáticos não conseguem refletir adequadamente o comportamento observado da estrutura, quando os valores obtidos numericamente diferem substancialmente dos observados em campo, ou quando os parâmetros monitorados apresentam comportamento sazonal, podem ser empregados "valores de controle estatísticos".

Importante salientar que os valores de controle determinísticos e estatísticos não são excludentes e, como indicado pelo *Corps of Engineers* [2], podem ser empregados conjuntamente para permitir o acompanhamento adequado das estruturas.

2.2 Valores de controle estatísticos

Segundo [3], "*algumas vezes, os engenheiros trabalham com problemas para os quais não há modelo mecanicista simples ou bem entendido que explique o fenômeno observado",* dificultando ou restringindo o estabelecimento de valores de controle determinísticos adequados para um determinado instrumento. Nestes casos, podem ser empregados modelos empíricos, usando o "*conhecimento científico do fenômeno, porém não diretamente desenvolvidos a partir do nosso conhecimento teórico ou dos primeiros conceitos do mecanismo básico"*.

Existem diversos métodos estatísticos que podem ser empregados para esta finalidade, tendo esta área avançado recentemente com o aumento da aquisição automática de dados da instrumentação e *big data*. Ferramentas tais como análises de regressão, séries temporais e redes neurais, dentre outras, permitem o desenvolvimento de modelos de correlação com variáveis explicativas, correlações com multivariáveis ou mesmo correlação entre múltiplos instrumentos.

Assim, é possível estabelecer faixas dentro das quais as medidas são esperadas e obter alarmes sobre a alteração de comportamento nas medidas de um instrumento, sem que estejam diretamente ou necessariamente atrelados a condições de comportamento estrutural indesejadas. Os valores de controle estatísticos assim obtidos têm recebido diversas denominações, sendo os mais comuns "valores ou limites estatísticos, de desempenho, de referência ou de advertência".

Tal abordagem se mostra útil na análise preliminar dos dados, em especial nas situações em que a aquisição de dados da instrumentação é feita de forma automatizada. Em geral, são empregados com a finalidade de analisar preliminarmente os dados da instrumentação (análise de primeiro nível) e permitir alertas automáticos em caso de alteração do comportamento das medidas que mereçam atenção e possam sugerir alteração no comportamento da barragem.

Os valores de controle assim estabelecidos definem zonas de normalidade, de controle ampliado, atenção e alerta, como proposto por Vasconcellos et. al. [1] e apresentado na Figura 1.

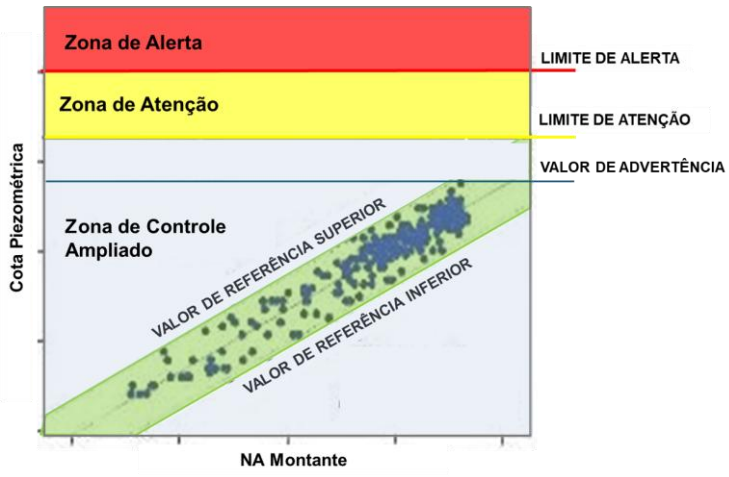


Figura 1 – Zonas delimitadas pelos valores de controle da instrumentação, para medidas com correlação significativa com uma grandeza-causa. Fonte: Vasconcellos et. al. [1].

A análise estatística dos dados pressupõe a existência de uma série histórica confiável de dados durante a fase de operação. Segundo Montgomery [3], “uma análise de quão bem uma amostra representa uma população é claramente necessária e as amostras devem ser selecionadas para fornecer regras de decisão adequadas”.

Desta forma, é importante considerar nos estudos apenas a parte da série histórica que efetivamente represente o comportamento adequado dos dados na fase atual de operação e que, se replicado para o futuro, indique que o comportamento do instrumento permanece adequado. Assim, devem ser removidos os efeitos nos primeiros anos de operação da estrutura ou, até mesmo, as primeiras décadas após o enchimento do reservatório, como adaptações da barragem na sua fundação, dissipação de pressões construtivas etc. Dados anômalos também devem ser criteriosamente removidos.

3. MÉTODOS ESTATÍSTICOS APLICÁVEIS A GRANDEZAS COM VARIAÇÕES SAZONAIS

“A coleção de ferramentas estatísticas que são usadas para modelar e explorar relações entre variáveis que estão relacionadas de maneira não determinística é chamada de análise de regressão” [3].

Em outras palavras, a análise de regressão é uma técnica estatística que permite o estudo da variabilidade de uma variável resposta em função da variabilidade de outra(s) variável(is) explicativa(s) observadas. Consiste em definir a forma da relação funcional entre as variáveis e é uma aproximação simplificada da relação real entre as variáveis de interesse. Dentre as principais aplicações está a previsão de tendências e valores futuros e a determinação do grau de influência das variáveis independentes sobre a variável dependente [4].

O modelo linear Y = βX + ϵ é um modelo geral que pode ser usado para ajustar qualquer relação que seja linear nos parâmetros desconhecidos β. Isso inclui a importante classe de modelos de regressão polinomial, por exemplo, o polinômio de segundo grau em uma variável:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \varepsilon \quad (1)$$

Os coeficientes parciais de regressão, β_j, fornecem a taxa de mudança na variável dependente (Y) correspondente à respectiva variável independente (X), mantendo constantes as demais variáveis independentes.

Destaca-se que o ajuste adequado de uma regressão requer alta qualidade nos seus três elementos básicos:

1. Dados: variável resposta como uma função de uma ou mais covariáveis observáveis.
2. Modelo: forma funcional e covariáveis fixadas, mas com parâmetros desconhecidos.
3. Estimação: a escolha de um método estatístico apropriado para a estimação dos parâmetros do modelo de regressão e observações dos dados para encontrar os “melhores” valores para os parâmetros.

O ajuste de um modelo de regressão requer várias suposições principalmente para realização de testes de hipóteses:

- Suposição de que os resíduos sejam variáveis aleatórias não correlacionadas, com média zero e variância constante (homocedasticidade).
- Os resíduos sejam normalmente distribuídos;
- Assume-se que a ordem do modelo é correta; isto é, se ajustamos um modelo de regressão linear simples, considera-se que o fenômeno realmente se comporta dessa forma.

O pesquisador deve sempre questionar a validade dessas suposições e realizar análises para verificar a adequação do modelo de regressão proposto, como indicado na Figura 2.

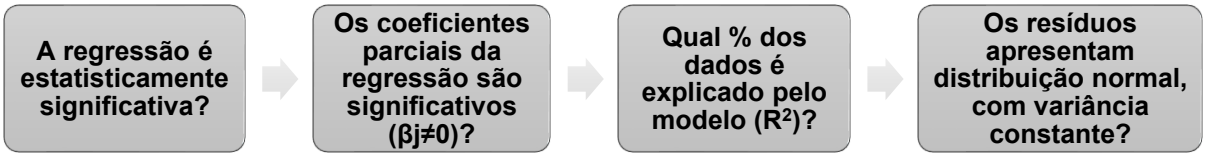


Figura 2 – Análises para verificação da adequação do modelo de regressão proposto.

3.1 Teste de significância da regressão

3.1.1 Teste de significância da regressão

O teste de significância da regressão tem por objetivo avaliar se o modelo de regressão é capaz de explicar, de forma significativa, a variação da variável resposta, Y. Nesse teste, as hipóteses apropriadas são:

$$\begin{cases} H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \cdots = \beta_k = 0 \\ H_1 : \beta_J \neq 0, para\ pelo\ menos\ um\ j. \end{cases} \quad (2)$$

Esse teste é geralmente realizado por meio do teste F, no qual se comparam duas hipóteses: a hipótese nula, de que todos os coeficientes das variáveis explicativas são iguais a zero, e a hipótese alternativa, de que pelo menos um deles é diferente de zero (indicando que o modelo possui capacidade explicativa). A rejeição de H_0 significa que pelo menos uma das variáveis explicativas X_1, X_2, ..., X_k, tem contribuição significativa para o modelo.

Para tal, é realizada a análise de variância (ANOVA), para avaliar o quanto da variação da variável resposta é explicada pelo modelo e o quanto permanece como erro:

$$F_O = \frac{SQ_R/k}{SQ_E/n-p} = \frac{QM_R}{QM_E} \quad (3)$$

que tem distribuição F com k e $n-p$ graus de liberdade no numerador e no denominador, respectivamente sendo $p = k + 1$.

Na ANOVA da regressão, a variabilidade total é dividida em duas partes principais: a soma de quadrados da regressão (associada ao modelo) e a soma de quadrados do erro (associada aos resíduos). A comparação entre essas duas parcelas é feita por meio da estatística F, que indica se a variabilidade explicada pelo modelo é significativamente maior do que a variabilidade não explicada.

Deve-se rejeitar H_0 se o valor calculado da estatística de teste na Tabela 1, F_0 for maior do que $F_{\alpha,k,n-p}$. O procedimento é resumido em uma tabela de análise de variância, como apresentado na Tabela 1:

Tabela 1- Análise de variância para o teste de H_0: $\beta_1 = \beta_2 = ... = \beta_k = 0$.
Fonte: Montgomery e Runger [3]

Fonte de Variação	***Soma dos Quadrados***	***Graus de Liberdade***	***Média Quadrática***	***F0***
Regressão	SQ_R	*k*	MQ_R	MQ_R / MQ_E
Erro ou resíduo	SQ_E	*n-p*	MQ_E	
Total	SQ_T	*n-1*		

3.1.2 Teste para os coeficientes individuais de regressão (β_j)

Os testes para os coeficientes individuais são utilizados para verificar se cada uma das variáveis presentes no modelo de regressão é significativa, indicando se incluir ou retirar uma variável regressora pode tornar o modelo mais robusto.

Para determinar a importância da variável explicativa β_j no modelo de regressão adotado, as hipóteses a serem testadas são:

$$\begin{cases} H_0 : \beta_j = 0 \\ H_1 : \beta_j \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Sendo a estatística do teste:

$$T_O = \frac{\widehat{\beta}_j}{\sqrt{V(\widehat{\beta}_j)}} \qquad j = 0, 1, \ldots, k \tag{5}$$

a qual tem distribuição *t-Student* com $(n - p)$ graus de liberdade se a hipótese nula é verdadeira. Onde, $V(\widehat{\beta}_j)$ é o j-ésimo elemento da diagonal principal da matriz $(X^tX)^{-1}$ multiplicado por $\hat{\sigma}^2$. Rejeita-se $H_0 : \beta_j = 0$ se $|T_O| > t_{\alpha/2,\, n-p}$. Se $H_0 : \beta_j = 0$ não for rejeitada, a variável X_j é uma candidata a ser excluída do modelo.

3.2 Coeficiente de determinação (R^2)

Uma medida largamente utilizada para ajudar a julgar a adequação do modelo de regressão é a razão de soma dos quadrados, que recebe o nome de coeficiente de determinação múltipla (R^2):

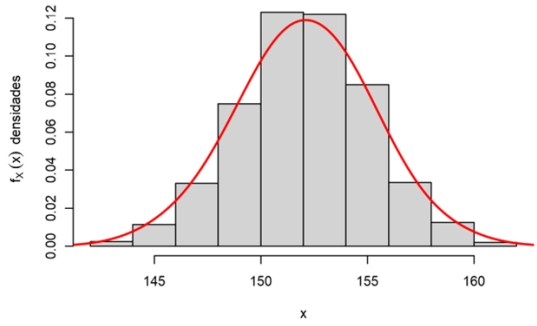
$$R^2 = \frac{SQ_R}{SQ_T} = \frac{V(\hat{Y})}{V(Y)} = 1 - \frac{SQ_R}{SQ_T} \tag{6}$$

O coeficiente de determinação pode ser interpretado como a proporção da variabilidade presente nas observações da variável resposta Y, que é "explicada" pelas variáveis independentes X_1, X_2, ..., X_k no modelo de regressão. O termo "explicada" tem apenas um significado numérico não implicando necessariamente em um conhecimento causa-efeito sobre o porquê da relação existente. Temos o coeficiente de determinação variando entre 0 e 1 ($0 \leq R^2 \leq 1$).

3.3 Análise dos resíduos da regressão

A análise de resíduos tem como objetivo verificar se os resíduos do modelo se comportam de forma aleatória, ou seja, serve para verificar a suposição de que os resíduos são não correlacionados e têm uma distribuição que é aproximadamente normal com média zero e variância constante (homocedasticidade).

O histograma e o gráfico de probabilidade normal dos resíduos (*Normal Q-Q plot*) são ferramentas úteis para observar, visualmente, se ocorre normalidade dos resíduos (Figura 3).



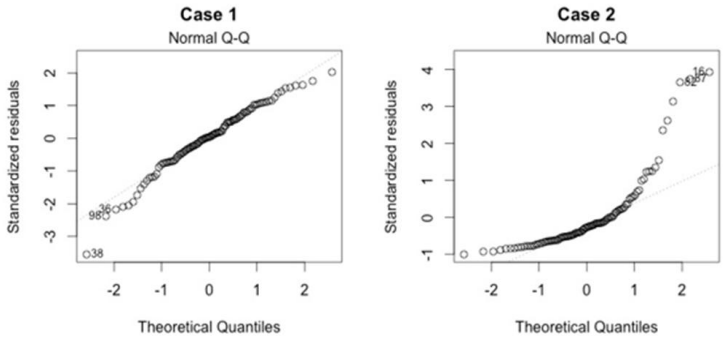
Aspecto do histograma característico da distribuição normal, com frequência mais alta no centro, decrescendo gradualmente para as caudas de maneira simétrica, em 'forma de sino'.

Média e mediana aproximadamente iguais e localizadas no centro do histograma (ponto de pico).

Figura 3 – Exemplo de histograma característico de distribuição normal dos dados.

Já no gráfico de probabilidade normal dos resíduos (Gráfico *Normal Q-Q plot*), o eixo x representa os quantis teóricos da distribuição normal e o eixo y representa os quantis

observados dos resíduos. Neste gráfico, uma linha reta indicaria resíduos perfeitamente normais, como apresentado na Figura 4.



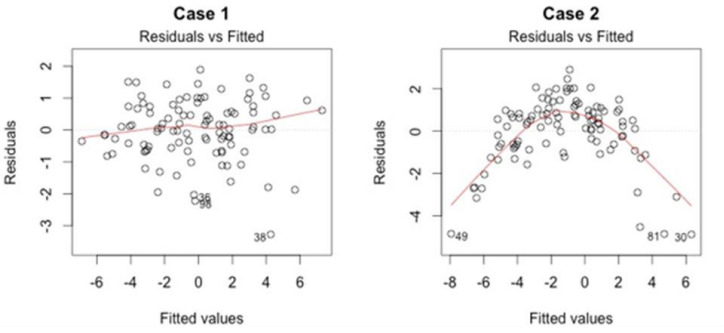
Case 1 - Resíduos aproximadamente normalmente distribuídos: pontos próximos da linha reta, apresentando pequenas oscilações similar a um padrão de "serpenteamento".

Case 2 - Resíduos não seguem uma distribuição normal: pontos se afastam de uma linha reta de forma sistemática formando padrões como curvatura em "S", desvios fortes nas extremidades (caudas) e/ou agrupamentos fora da linha.

Figura 4 – Gráfico Normal Q-Q plot para verificação da normalidade dos resíduos. Fonte: adaptado de [5].

Além da normalidade dos resíduos, outra premissa importante no modelo de regressão linear clássico é que a variância de cada termo de erro ε_i, condicionado aos valores selecionados das variáveis explanatórias, seja algum número constante igual a σ^2 (variância). Essa é a premissa da homocedasticidade (ou seja, *homo* igual, *cedasticidade*, espalhamento), ou seja, igual variância.

A verificação da homocedasticidade dos dados pode ser feita por meio da análise visual de gráficos de dispersão comparando os resíduos do modelo (eixo y) com os valores ajustados (eixo x) (gráfico Residuals versus Fitted), que devem apresentar pontos dispostos aleatoriamente, sem nenhum padrão definido, como mostrado na Figura 5.



Case 1 – Variância dos resíduos aproximadamente constante: distribuição dos resíduos em torno de uma linha horizontal, sem padrões distintos, formando uma espécie de "nuvem" uniforme com espalhamento semelhante ao longo de todo eixo x.

Case 2 – A variância dos resíduos não é constante: existência de padrões estruturados (p.e uma relação não linear como uma parábola) e/ou aumento ou diminuição da dispersão dos resíduos.

Figura 5 – Gráfico Residuals versus Fitted para avaliação da homocedasticidade dos resíduos. Fonte: adaptado de [5].

A análise visual é uma ferramenta importante, porém deve ser complementada com testes estatísticos, como o teste de Shapiro-Wilk para avaliação da normalidade dos resíduos, e o teste de Koenker-Bassett para verificação da homocedasticidade.

3.3.1 Teste de Shapiro-Wilk para normalidade

O teste de Shapiro-Wilk testa a hipótese nula que uma amostra $y_1, y_2, \cdots, y_n$, retirada de uma população, tenha distribuição normal:

- Hipótese nula (H_0): os resíduos são normalmente distribuídos.
- Hipótese alternativa (H_1): os resíduos não seguem distribuição normal.

A decisão a respeito da normalidade dos dados é baseada no p-valor. Se o p-valor calculado for menor que o nível α de significância, rejeita-se a hipótese de normalidade dos resíduos (H_0), pois há evidências de não normalidade.

3.3.2 Teste de Koenker-Bassett para homocedasticidade

O teste de Koenker-Bassett é utilizado para verificar a homocedasticidade dos resíduos em modelos de regressão, ou seja, se a variância dos resíduos permanece constante ao longo dos valores ajustados. É uma versão mais robusta do teste de Breusch-Pagan, pois não depende da suposição de normalidade dos resíduos, tornando-se mais adequado em situações práticas onde essa condição pode não ser plenamente atendida.

No teste, é avaliada a relação entre os resíduos (geralmente ao quadrado) e as variáveis explicativas do modelo:

- Hipótese nula (H_0): os resíduos são homocedásticos (variância constante).
- Hipótese alternativa (H_1): há heterocedasticidade (variância não constante).

A decisão também é baseada no valor-p. Se o p-valor calculado for menor que o nível α de significância, rejeita-se a hipótese nula (H_0), pois há evidência de heterocedasticidade.

4. REAMOSTRAGEM BOOTSTRAP

Quando os resíduos não seguem uma distribuição normal, as premissas dos testes estatísticos podem ser violadas e o modelo de regressão proposto pode não ser considerado representativo dos dados. Cabe ressaltar que a normalidade dos resíduos é especialmente importante em amostras pequenas, nas quais a distribuição dos dados pode impactar significativamente os resultados, uma vez que os testes de hipóteses relativos aos parâmetros do modelo dependem das premissas de normalidade, independência e homocedasticidade dos resíduos.

As técnicas *bootstrap* são uma classe de métodos Monte Carlo que estimam a distribuição de uma população por reamostragem e são frequentemente utilizados quando a distribuição da população alvo não é especificada e a amostra é a única informação disponível [6].

A técnica foi introduzida por Efron em 1979 para fazer certos tipos de inferências estatísticas. A noção básica é a de que os dados em si, vistos como distribuição de frequências, representam a melhor imagem disponível da distribuição de frequências da qual eles são amostrados, podendo se referir a *bootstrap* paramétrico ou não-paramétrico (Figura 6).

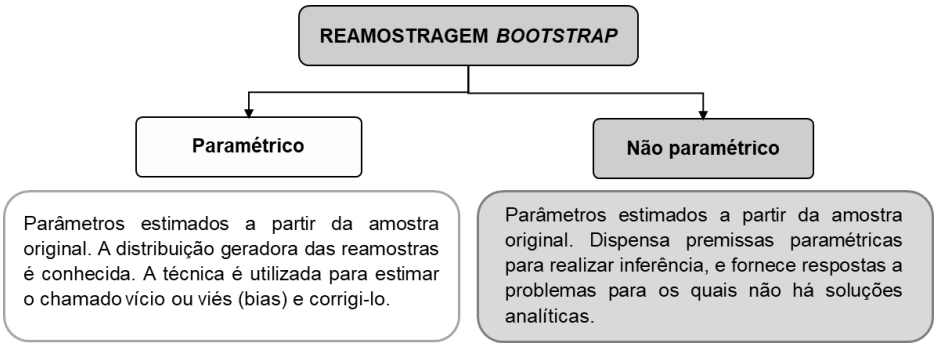


Figura 6 – Técnicas de reamostragem *bootstrap*.

O procedimento consiste em sortear, com reposição, dados pertencentes a uma amostra retirada anteriormente, de modo a formar uma nova amostra. As amostras *bootstrap*, criadas a partir da amostra original, têm o mesmo tamanho e são compostas dos mesmos elementos da amostra inicial.

A técnica de reamostragem *bootstrap* não paramétrico é especialmente valiosa quando não se pode assumir uma distribuição paramétrica específica para os dados, permitindo que sejam realizadas inferências sem a necessidade de suposições sobre a forma da distribuição da estatística de interesse.

Por não exigir que os dados sigam uma distribuição específica, essa técnica pode ser aplicada a uma ampla variedade de problemas estatísticos, sendo particularmente útil em situações nas quais o tamanho da amostra é pequeno, pois permite a obtenção de intervalos de confiança e testes de hipóteses sem depender de grandes amostras para garantir a validade das inferências.

Outro aspecto importante do *bootstrap* não paramétrico é sua aplicação em modelos de regressão, podendo ser utilizado para avaliar a incerteza nas estimativas dos coeficientes e permitir que os analistas obtenham intervalos de confiança para esses parâmetros. Isso é especialmente útil em cenários onde os pressupostos clássicos de homocedasticidade e normalidade dos resíduos não são atendidos, oferecendo uma alternativa para a validação dos modelos.

Na prática, isso significa que a inferência (como testes de hipóteses e intervalos de confiança) passa a refletir melhor o comportamento real dos dados, mesmo na presença de assimetria, caudas pesadas ou outras violações da normalidade. Em suma, trata-se de uma alternativa robusta e flexível para a análise de modelos de regressão quando os resíduos não atendem ao pressuposto de normalidade, permitindo conclusões estatísticas mais confiáveis nessas condições.

Por outro lado, exige maior esforço computacional (quando se trabalha com grandes conjuntos de dados ou modelos complexos) e depende da qualidade da amostra original, podendo gerar estimativas enviesadas se a amostra não for representativa.

5. DEFINIÇÃO DE VALORES DE CONTROLE ESTATÍSTICOS A PARTIR DOS MODELOS DE REGRESSÃO

Os modelos de regressão permitem a definição de faixas de valores dentro das quais as medidas de um determinado instrumento são esperadas e, desta forma, delimitar

zonas de normalidade, de controle ampliado, atenção e alerta (como propostas na Figura 1), aumentando a eficiência do monitoramento do comportamento de uma barragem.

Para a definição destas faixas, o objetivo é determinar com 95% de confiança, os limites inferior e superior entre os quais uma observação real futura deve se situar para ser considerada adequada conforme o histórico anterior das medidas.

Para tal, será utilizado o intervalo de previsão, que delimita observações futuras provenientes de uma população ou distribuição [3]. Cabe destacar que o intervalo de confiança expressa o erro na estimação da média de uma distribuição ($\overline{X}$ - μ), enquanto o intervalo de previsão expressa o erro na previsão de uma observação futura ($X_{n+1} - \overline{X}$).

Um intervalo de previsão de 100(1 - α) % para a futura observação Y_0 baseada em $x_{01}, x_{02}, \ldots, x_{0k}$ é:

$$\hat{Y}_0 - t_{\alpha/2,n-p}\sqrt{\hat{\sigma}^2(1 + x_0'(X'X)^{-1}x_0)} \leq Y_0 \leq \hat{Y}_0 - t_{\alpha/2,n-p}\sqrt{\hat{\sigma}^2(1 + x_0'(X'X)^{-1}x_0)} \quad (7)$$

Quando empregada a reamostragem *bootstrap*, o intervalo de previsão não é obtido por uma fórmula fechada única (como na regressão clássica), mas sim a partir da distribuição empírica das previsões geradas pelas reamostragens. Uma representação geral é dada por:

$$IP_{(1-\alpha)}(x_0) = \left[Q_{\alpha/2}(\hat{y}_0^*), Q_{1-\alpha/2}(\hat{y}_0^*)\right] \quad (8)$$

onde:

- $\hat{y}_0^*$ são as previsões *bootstrap* para um novo ponto x_0, obtidas a partir de cada reamostra.
- $Q_{\alpha/2}$ e $Q_{1-\alpha/2}$ são os quantis empíricos da distribuição dessas previsões.
- α é o nível de significância (p.e. 5% para um intervalo de 95%).

Para intervalos de previsão (e não apenas de confiança da média), é comum incorporar também a variabilidade dos resíduos:

$$\tilde{y}_0^{*b} = \hat{y}_0^{*(b)} + \varepsilon^{*(b)} \quad (9)$$

onde $\varepsilon^{*(b)}$ são resíduos reamostrados. Nesse caso, o intervalo passa a refletir tanto a incerteza do modelo quanto a variabilidade inerente dos dados.

6. ESTUDO DE CASO DE APLICAÇÃO DO *BOOTSTRAP* NÃO PARAMÉTRICO

Como descrito anteriormente, o uso de metologias estatísticas para o estabelecimento de valores de controle para a instrumentação é especialmente adequado na fase de operação de uma barragem, quando se dispõe de um histórico de medidas relativamente longo e os dados sob análise apresentam variação sazonal correlacionas com variações de grandezas explicativas, tais como, nível de montante, de jusante ou temperatura.

Permitem estabelecer faixas dentro das quais as medidas são esperadas e obter alarmes sobre a alteração de comportamento nas medidas de um instrumento, sem que estejam diretamente ou necessariamente atrelados a condições de comportamento estrutural indesejadas.

A metodologia descrita no presente artigo foi aplicada para um empreendimento com 294 instrumentos instalados, dentre os quais 107 (piezômetros, medidores de nível d'água e medidores de vazão) apresentavam variações sazonais das leituras.

Para estes instrumentos, foram desenvolvidos modelos de correlação com o nível do reservatório. Destes, 89 instrumentos apresentaram R^2>0,70 e resíduos normais, podendo ser empregados modelos ajustados por regressão para a definição da zona de normalidade (faixa de valores esperados para as medidas).

No entanto, para 18 instrumentos obteve-se R^2 alto (>0,88), mas a distribuição dos resíduos não apresentava normalidade, de modo que o ajuste por regressão não era estatisticamente aplicável. Para estes casos, a reamostragem *booststrap* não paramétrico surgiu como uma possível solução.

As etapas seguidas na aplicação das técnicas de análise de regressão e de reamostragem *bootstrap* são descritas a seguir para uma das seções da barragem de terra homogênea, instrumentada com piezômetros, e apresentada na Figura 7.

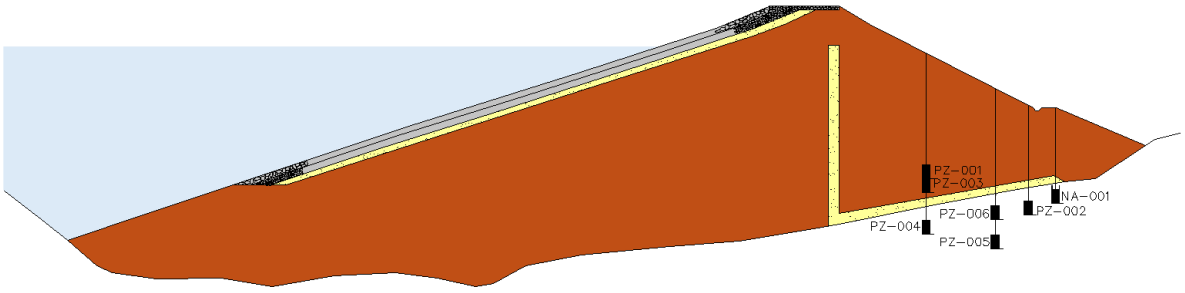


Figura 7 – Seção instrumentada da barragem de terra homogênea- seção A.

Inicialmente foram realizadas análises de regressão para todos os piezômetros instalados nesta seção.

Foram empregados dados de série histórica de piezometria (cota piezométrica) e do nível de montante do reservatório (NA montante) registrados ao longo do período de operação da barragem entre 1986 e 2023. Os dados foram tratados, tendo sido eliminados registros sem a informação correspondente da cota piezométrica, registros repetidos, leituras anômalas claramente sugestivas de erro de leitura ou transcrição, valores iniciais com variações associadas ao enchimento do reservatório e que, portanto, não correspondem ao comportamento atual esperado das medidas.

O ajuste do modelo de regressão foi executado no R, uma linguagem e ambiente de *software* livre, focado em computação estatística, análise de dados e gráficos, amplamente utilizado em ciência de dados, cuja interface mais comum é o *RStudio*. Para avaliar se o modelo ajustado era estatisticamente significativo foram calculados o coeficiente de determinação (R^2) e a estatística F do modelo ajustado, sendo uma correlação significativa dada pelo p-valor <0,05 (5% de significância).

Para cada um dos modelos de regressão foi verificado se ocorre violação dos pressupostos de normalidade dos resíduos e variância constante, levando em consideração:

i. Normalidade dos resíduos do modelo ajustado de acordo com análise visual dos gráficos de histograma e Normal Q-Q Plot e o teste Shapiro-Wilk.
ii. Homocesdasticidade dos resíduos do modelo ajustado, de acordo com análise visual do gráfico *Residuals vs Fitted* e teste de Koenker-Bassett.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - R^2 e resíduos dos modelos de regressão para os instrumentos da seção A.

Instrumento	R^2	Normalidade dos resíduos	Método empregado para definição dos valores de referência
NA-001	0,90	sim	Regressão
PZ-001	0,91	sim	Regressão
PZ-002	0,92	**não**	Regressão / Técnica *Bootstrap*
PZ-003	0,93	sim	Regressão
PZ-004	0,94	**não**	Regressão / Técnica *Bootstrap*
PZ-005	0,93	**não**	Regressão / Técnica *Bootstrap*
PZ-006	0,95	sim	Regressão

Como pode ser observado, os piezômetros PZ-002, PZ-004 e PZ-005 não apresentaram normalidade dos resíduos, de modo que o ajuste por regressão não era estatisticamente aplicável. Para estes instrumentos, o estudo desenvolvido será detalhado nos itens a seguir, incluindo a aplicação da reamostragem *booststrap* não paramétrico.

6.1 Modelo de regressão linear

Os resultados dos modelos de regressão para os piezômetros 002, 004 e 005 estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Métricas dos modelos ajustados por regressão para os PZs 002, 004 e 005.

Instrumento	N° de observações	Modelo de regressão linear	Estatística F	R^2	Erro padrão residual
PZ-002	631	$\hat{Y} = 0{,}02030x^2 - 28{,}16x + 10.460$	3.563	0,92	0,699
PZ-004	633	$\hat{Y} = 0{,}02425x^2 - 33{,}65x + 12.370$	4.924	0,91	0,691
PZ-005	628	$\hat{Y} = 0{,}02176x^2 - 30{,}17x + 11.150$	4.401	0,93	0,688

Todos os modelos apresentaram p-valor < 0,001.

Para cada um destes modelos de regressão foi verificado se ocorre violação dos pressupostos de normalidade (análise visual dos gráficos de histograma e *Normal Q-Q Plot* e o teste Shapiro-Wilk) e de homocesdasticidade dos resíduos do modelo ajustado (análise visual do gráfico *Residuals vs Fitted* e teste de Koenker-Bassett).

A Figura 8 (a) mostra que não existe simetria nos histogramas da distribuição dos resíduos em nenhum dos modelos ajustados. A frequência mais alta não ocorre necessariamente no centro e a ascensão e o decréscimo das caudas não é gradual.

Assim, a verificação visual da distribuição dos resíduos é insuficiente para atestar a distribuição normal.

No gráfico *Normal Q-Q plot* (Figura 8, b), não é observada boa aderência e alinhamento à reta da diagonal para os tramos inferior e superior, também sugerindo que os resíduos não são normalmente distribuídos.

Por fim, o gráfico *Residuals vs Fitted* (Figura 8, c), mostra que, para todos os instrumentos, a variabilidade dos resíduos não está igualmente distribuída em torno da linha horizontal. A variabilidade percebida é um apontamento de que possivelmente existe relação não linear não explicada pelo modelo.

Desta forma, fica evidenciado que, a partir da análise visual, não pode ser assumida distribuição normal para os resíduos e podem haver questões quanto à homocedasticidade. Em consideração, seguiu-se com a aplicação dos testes de Shapiro-Wilk (normalidade dos resíduos) e de Koenker-Basset (homocedasticidade) para verificação da avaliação visual. Os resultados dos testes estão resumidos na Tabela 4.

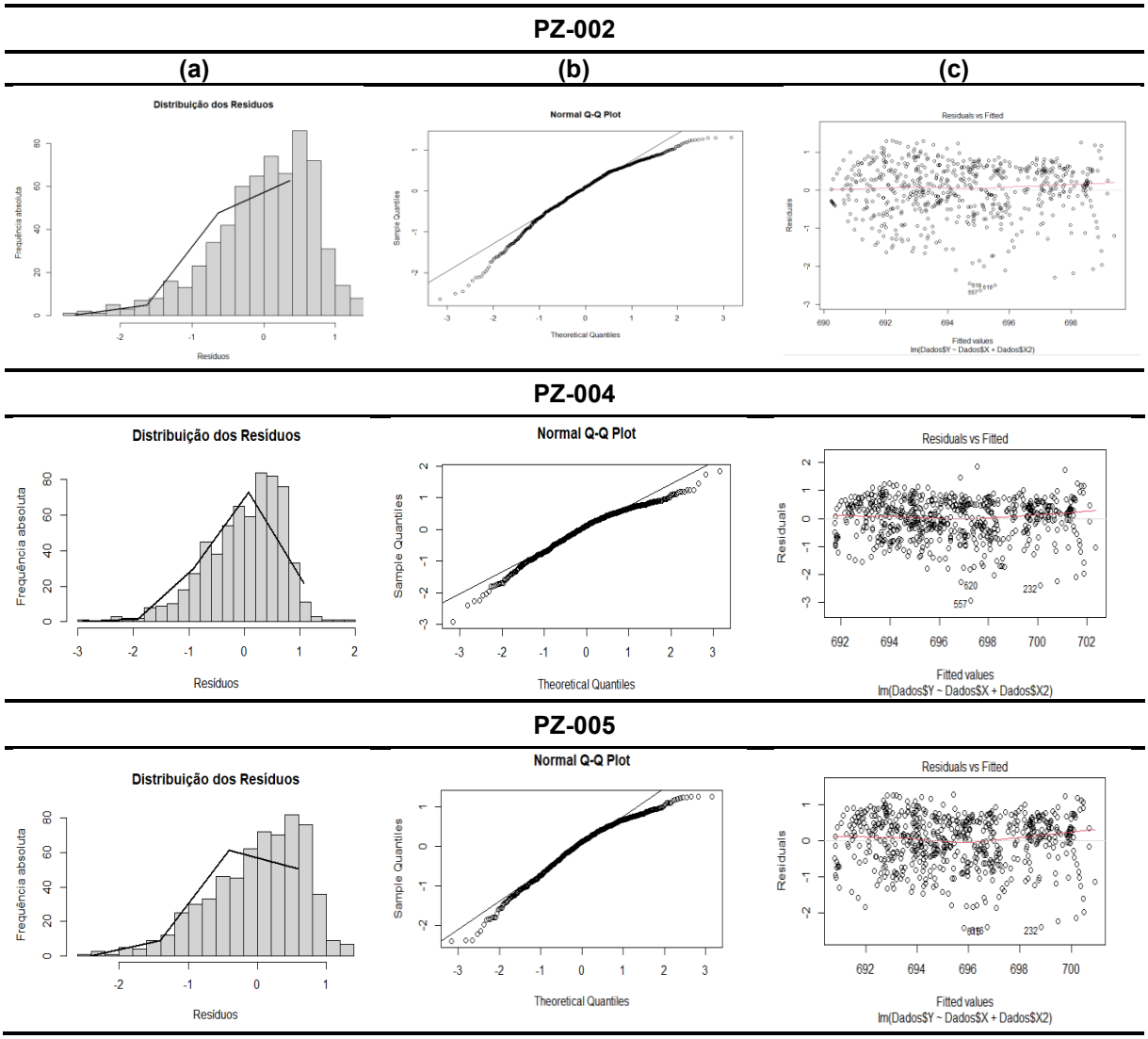


Figura 8 – Gráficos para análise visual dos resíduos.

Tabela 4 – Métricas de análise residual dos modelos ajustados.

Instrumento	Shapiro-Wilk Estatística W	p-valor	Koenker-Basset Estatística F	p-valor
PZ-002	0,9569	$1{,}228 \cdot 10^{-12}$	0,1084	0,742
PZ-004	0,9636	$2{,}016 \cdot 10^{-11}$	1,523	0,218
PZ-005	0,9616	$9{,}603 \cdot 10^{-12}$	0,3450	0,558

Os testes de Shapiro-Wilk aplicados indicaram rejeição da normalidade dos resíduos em todos os modelos ($p < 0{,}001$), confirmando a constatação a análise visual (H_0 é rejeitada para p-valor < 0,05).

Com relação à homocedasticidade, nos testes de Koenker-Basset, com p-valor > 0,05, não rejeitamos H_0, ou seja, não há evidências de heterocedasticidade. A variância dos resíduos pode ser considerada constante.

Em suma, verificou-se que nos resíduos dos modelos ajustados há questões nem tanto significativas quanto à homocedasticidade, porém, os resíduos não atendem à premissa de normalidade.

Se os resíduos não apresentam distribuição normal, existem várias transformações que podem ser aplicadas na tentativa de normalizá-los, sendo as mais comuns a transformação logarítmica, a transformação de Box-Cox e a transformação de raiz quadrada. Contudo, essas técnicas não surtiram efeito no que concerne à redução da assimetria e a estabilização da variância a fim de que os resíduos se aproximassem de uma distribuição normal.

Desse modo, quando a normalidade não pode ser assumida, pressupõe-se considerar a utilização de métodos não paramétricos que permitam aproximar a distribuição dos resíduos. Um dos recursos possíveis para realização dos testes de hipóteses é o uso da técnica de reamostragem *bootstrap* não paramétrico, descrita anteriormente, para identificar e avaliar a incerteza nas estimativas dos coeficientes de regressão parciais (β1 e β2,), ao nível de confiança de 95%. Em especial, a técnica de reamostragem *bootstrap* não paramétrica funciona bem para casos em que a homocedasticidade é próxima ao nível de significância adotado de 5% (ou 0,05).

6.2 Reamostragem *bootstrap* não-paramétrica

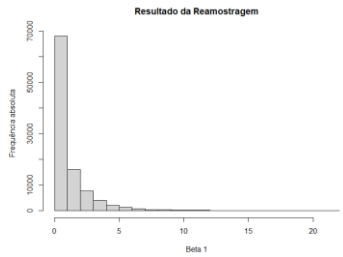
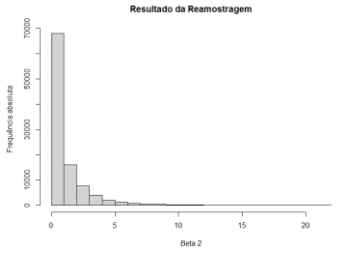
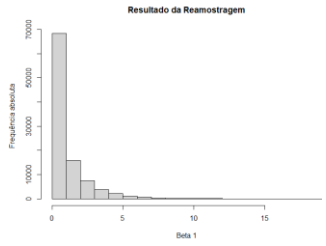
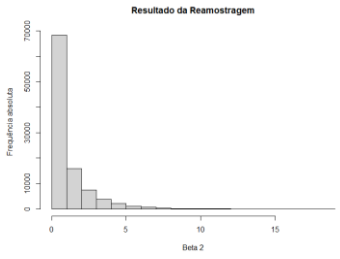
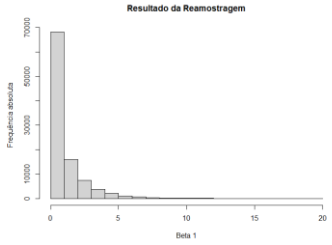
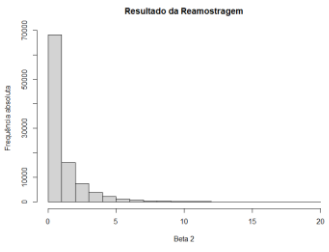
O processo de determinar a distribuição dos resíduos por meio da reamostragem *bootstrap* não paramétrica em um modelo de regressão é, essencialmente, uma forma de reconstruir empiricamente o comportamento dos resíduos a partir dos próprios dados, sem assumir normalidade. A lógica é prática - você usa o que já observou para simular o que poderia acontecer.

No R, o algoritmo ajusta o modelo de original com os dados observados e são obtidos os valores ajustados e os resíduos. Os resíduos estimados passam a representar uma amostra da distribuição real dos resíduos (ainda que não seja normal). Então, são geradas 100.000 amostras *bootstrap* com reposição a partir dos dados originais. Para cada reamostra, constroem-se novos valores da variável resposta. Ou seja, mantém-se a estrutura do modelo e “injeta-se” variabilidade baseada nos resíduos observados.

Para cada conjunto, ajusta-se novamente o modelo, obtendo novos resíduos. Ao final de 100.000 iterações, obtemos um grande conjunto de resíduos reamostrados. Essa coleção representa uma aproximação empírica da distribuição dos resíduos.

A Figura 9 apresenta a distribuição empírica da distribuição dos resíduos obtida a partir reamostragem *bootstrap* para cada um dos coeficientes parciais de regressão β_1 e β_2, de cada um dos modelos, positivamente assimétrica à direita, semelhante à distribuição de Fisher (Distribuição F de Snedecor), que surge frequentemente como a distribuição nula da estatística de um teste, mais notadamente na análise de variância.

Assim, a hipótese nula de que β_1 e β_2 são iguais a zero pode ser rejeitada, uma vez que o p-valor obtido pela reamostragem *bootstrap* dos resíduos foi muito menor que o nível de significância, $\alpha = 0{,}05$. Assim, pode-se seguir com a obtenção dos intervalos de previsão.

Beta 1	Beta 2
PZ-002	
	
F_o = 285,72 p-valor = $9{,}999 \cdot 10^{-6}$	F_o = 296,36 p-valor = $9{,}999 \cdot 10^{-6}$
PZ-004	
	
F_o = 425,39 p-valor = $9{,}999 \cdot 10^{-6}$	F_o = 440,78 p-valor = $9{,}999 \cdot 10^{-6}$
PZ-005	
	
F_o = 343,64 p-valor = $9{,}999 \cdot 10^{-6}$	F_o = 356,78 p-valor = $9{,}999 \cdot 10^{-6}$

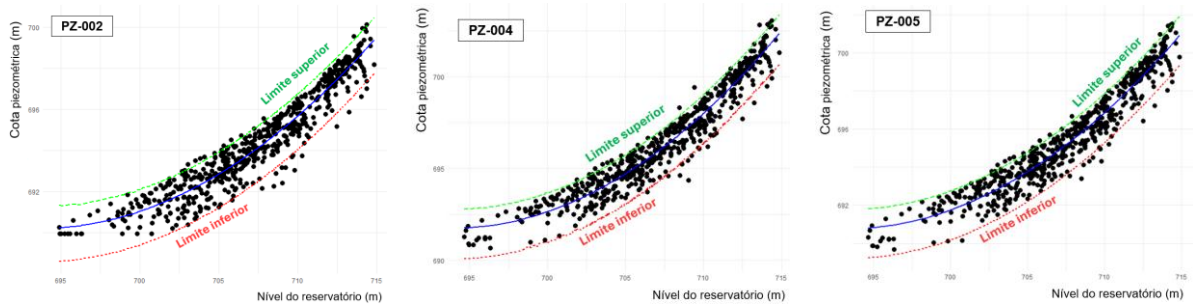
Todos os modelos apresentaram p-valor < 0,001.

Figura 9 – Distribuição dos coeficientes de regressão parciais, β1 e β2, após reamostragem via bootstrap não paramétrico.

6.3 Definição dos valores de controle

A faixa esperada para as medidas futuras, tendo por base o histórico de dados de cada instrumento, pode então ser construída no R, conforme etapas a seguir e cujos resultados estão apresentados na Figura 10:

i. Gerar B amostras *bootstrap* (com reposição) a partir dos dados originais.
ii. Ajustar o modelo em cada amostra.
iii. Para cada modelo ajustado, calcular a previsão no ponto de interesse x_0, obtendo $\hat{y}_0^{*(1)}$, $\hat{y}_0^{*(2)}$, ..., $\hat{y}_0^{*(B)}$.
iv. Ordenar essas previsões.
v. O intervalo de previsão é dado pelos percentis da distribuição empírica.



$\hat{Y} = 0{,}02030x^2 - 28{,}16x + 10.460$ $\hat{Y} = 0{,}02425x^2 - 33{,}65x + 12.370$ $\hat{Y} = 0{,}02176x^2 - 30{,}17x + 11.150$

Figura 10 – Dispersão e limites de previsão para os modelos de regressão ajustados.

Assim, o modelo estabelecido pela regressão da série histórica (Figura 10) permitiu delimitar a chamada “Zona de Normalidade” para cada instrumento, aqui definida como aquela na qual as medidas se encontram dentro do esperado para determinado nível do reservatório. Esta zona é delimitada por meio dos limites de previsão calculados com uso da abordagem *bootstrap* não paramétrico, neste trabalho denominados. “Limite de Referência Superior” (linha tracejada em verde) e “Limite de Referência Inferior” (linha tracejada em vermelho).

7. CONCLUSÕES

A técnica de reamostragem *bootstrap* não paramétrico se mostrou eficiente na avaliação de modelos de regressão de dados da instrumentação que apresentam sazonalidade correlacionada com o nível do reservatório, permitindo o emprego destes modelos mesmo quando não atendidas as condições de normalidade e homocedasticidade dos resíduos.

O emprego desta técnica se faz importante, pois, muitas vezes, apesar dos dados apresentarem coeficiente de correlação (R^2) elevado, não são atendidos os pressupostos de normalidade e homocedasticidade, impedindo a validação dos modelos de regressão obtidos.

Nos estudos desenvolvidos, a técnica de reamostragem *bootstrap* não paramétrico permitiu identificar e avaliar a incerteza nas estimativas dos coeficientes de regressão parciais ao nível de confiança de 95%. A distribuição obtida por esta técnica nos levou a rejeitar a hipótese nula de que os coeficientes parciais de regressão fossem iguais a zero, com confiança de 95%, registrando um p-valor próximo de zero, o que validou

os modelos propostos, apesar de não apresentarem resíduos com distribuição normal e homocedasticidade.

Além disso, permitiu a obtenção dos intervalos de previsão *bootstrap*, em sintonia com metodologia proposta por Vasconcellos et. al. [1], para estabelecer uma faixa dentro da qual as medidas são esperadas (zonas de normalidade) e obter alarmes sobre a alteração de comportamento de um instrumento (zonas de controle ampliado, atenção e alerta).

Finalmente, destaca-se a importância de valores de controle estabelecidos estatisticamente para a detecção precoce de tendências adversas nas medidas da instrumentação, pois permitem captar eventuais anomalias na estrutura da barragem antes que se configurem situações limite de segurança. Com isso, são ampliados os tempos de resposta em eventuais situações de risco, contribuindo para a segurança das estruturas monitoradas.

8. PALAVRAS-CHAVE

Instrumentação, valores de controle, limites, regressão, *bootstrap*

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] VASCONCELLOS, T.M., RACHID, M.A., MARTINS, M.N.C., NUNES, E.S., FUSARO, T.C. (2023). “Discussão sobre Valores de Controle para a Instrumentação”. XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens - CBDB. Foz do Iguaçu.

[2] USACE (2004). EM 1110-2-2300- General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams. Appendix E - Process for Establishing Performance Parameters. Disponível em: <https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/>. Acesso em 21/05/2023.

[3] MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C. (2023). “Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros”. 7.ed., Rio de Janeiro.

[4] CRUZ, D.C. (2025). “Reamostragem Bootstrap Não Paramétrico na Validação de Valores de Controle para Piezometria”. Monografia. Programa de Pós-Graduação em Estatística Aplicada. UFMG.

[5] KIM, B. (2015). “Understanding Diagnostic Plots for Linear Regression Analysis”. Disponível em: https://library.virginia.edu/data/articles/diagnostic-plots. Acesso em 27/03/2026.

[6] SANTOS, CRISTIANO DE CARVALHO (2022). “Métodos computacionais aplicados à estatística – implementação no software R”. Relatório Técnico. Série Ensino. Instituto de Ciências Exatas – Departamento de Estatística. UFMG.

	**Deborah Cardoso da CRUZ** Engenheira de Produção-Civil pelo CEFET/MG (2017) e Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela UNB (2019). Atua na Enemax desde 2019 na área de Segurança de Barragens, com experiência em inspeções de segurança, análise da instrumentação, elaboração de Plano de Segurança de Barragem e Revisão Periódica de Segurança.
	**Teresa Cristina FUSARO** Engenheira Civil pela UFMG e Mestre em Geotecnia de Barragens pela UFOP, com mais de 40 anos de experiência na área de segurança e manutenção de barragens. Atuou na Cemig como engenheira (1986 a 2003) e como gerente de Segurança de Barragens e Manutenção Civil (2004 a 2013). Sócia-proprietária da Fusaro Engenharia e Consultoria Ltda, atualmente atua como consultora nas áreas de inspeção, instrumentação e análises de riscos de barragens.
	**Eric Silveira NUNES** Engenheiro Civil pela UFMG (2023). Atua na Enemax Engenharia e Consultoria na área de Segurança de Barragens, Geotecnia e Instrumentação, tendo atuado na realização de estudos de estabilidade e inspeções de segurança. Atualmente atua em análises da instrumentação e em monitoramento topográfico.
	**Túlio Marcos de VASCONCELLOS Filho** Engenheiro Civil pela UFMG (2020) com pós-graduação em Eng. Geotécnica pela PUC Minas (2023). Atua na Enemax Engenharia e Consultoria na área de Segurança de Barragens e de Estruturas e Geotecnia, em estudos de estabilidade, definição de níveis de controle para instrumentação, inspeções de segurança, Planos de Segurança de Barragem e Revisões Periódicas de Segurança.
	**Prof. Dr. Roberto da Costa QUININO** Professor Titular do Departamento de Estatística da Universidade Federal de Minas Gerais. Orienta trabalhos de Graduação, Especialização, Mestrado e Doutorado. Atua nas áreas de Controle Estatístico de Processos, Modelos Lineares Generalizados e técnicas de Aprendizado de Máquina.

SEMANA DE BARRAGENS 2026
DAMSWEEK 2026

SIB
SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Da medição à decisão

Evolução do monitoramento geotécnico em barragens

IN.4 • Automatização e Novas Tecnologias de Monitoramento

Filipe Colen de Freitas Guimarães - VALE

SIB
SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

1- Começar pelo incômodo certo

Antes de discutir tecnologia, precisamos discutir decisão.

“O que preciso saber para agir antes que a barragem me surpreenda?”

O que monitorar?
Mecanismo de falha, indicador físico e parâmetro mensurável.

Quando monitorar?
Fase de vida, condição operacional, chuva, nível, obra, anomalia.

Por que monitorar?
Confirmar hipóteses, reduzir incerteza, acionar respostas.

Qual resposta espero?
Alerta, investigação, intervenção, evacuação ou aprendizagem.

Tese da palestra

A maturidade do monitoramento evolui quando dados passam a orientar decisões auditáveis.



Monitoramento bom

É desenhado de trás para frente: primeiro a decisão, depois o dado necessário.

Monitoramento excelente

Integra instrumentação, inspeção, modelos, governança e prontidão operacional.

O que monitorar: do modo de falha ao parâmetro

Instrumento sem hipótese geotécnica vira ruído caro.

MODO DE FALHA	INDICADORES OBSERVÁVEIS
Piping / erosão interna	Vazão, turbidez, piezometria, gradiente
Instabilidade / deformação	Deslocamento, recalque, inclinômetro, radar/GNSS
Liquefação / perda de resistência	Poropressão, aceleração, deformação, gatilhos sísmicos
Vertedouro / hidrologia	Nível do reservatório, chuva, vazão, previsão hidrometeorológica
Fundações / ombreiras	Uplift, deslocamento, juntas, seepage, resposta térmica

Quando monitorar: frequência depende do risco e da condição

Monitoramento é dinâmico: muda com nível, chuva, obra, anomalia e fase de vida da estrutura.

1	2	3	4	5	6
Projeto / construção	**1º enchimento**	**Operação normal**	**Evento extremo**	**Anomalia**	**Fechamento / pós-fechamento**
Baseline e hipóteses	Resposta acelerada	Tendência e sazonalidade	Alta frequência	TARP e investigação	Legado e estabilidade

Regra prática

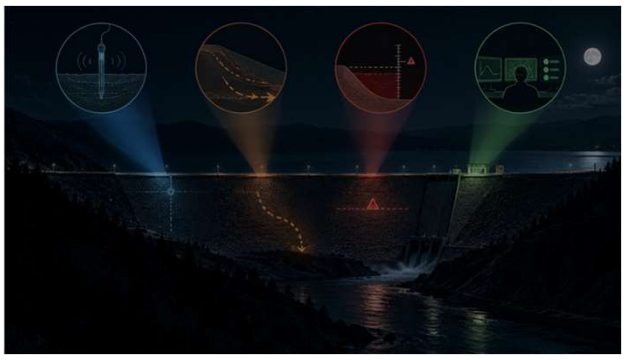
A frequência deve ser proporcional à velocidade esperada do fenômeno e ao tempo necessário de resposta.

Por que monitorar: quatro objetivos que se complementam

Segurança, desempenho e governança convergem no mesmo fluxo de informação.

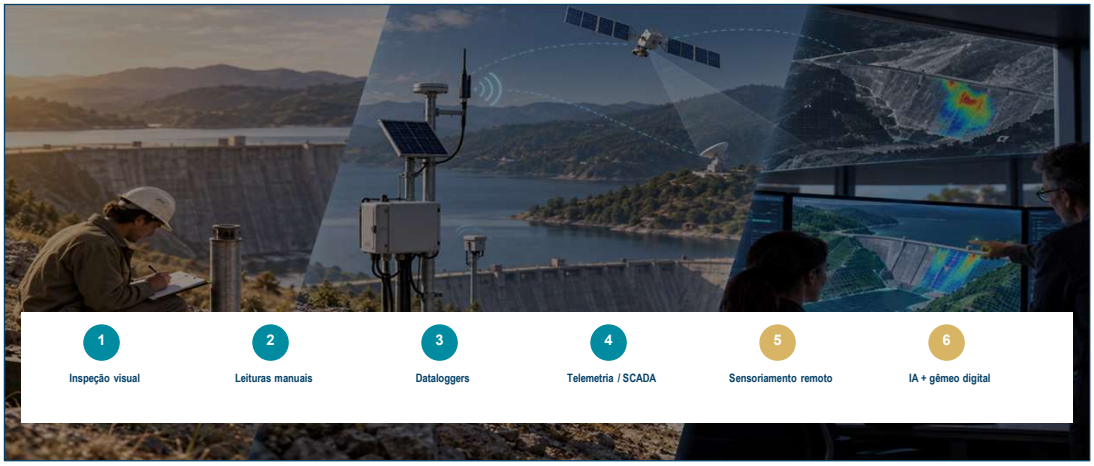
1	2	3	4
Verificar premissas de projeto	**Detectar tendência anômala**	**Acionar respostas e TARPs**	**Aprender e reduzir incerteza**

“O dado só vira proteção quando aciona uma decisão no tempo certo.”



A evolução: de observações discretas a sistemas cognitivos

O salto não é apenas tecnológico: é de filosofia operacional.



1. Inspeção e experiência de campo

O primeiro sensor da barragem sempre foi o olhar treinado.

Sinais típicos

- Trincas, recalques e surgências
- Alteração de cor, turbidez e vegetação
- Saturação no pé, erosões, ravinas
- Comportamento de estruturas hidráulicas

"A tecnologia amplia o campo de visão, mas não substitui a interpretação geotécnica."

2. Instrumentação geotécnica clássica

A pergunta mudou de “a barragem está íntegra?” para “como ela está se comportando?”.

Piezômetros
poropressão / nível freático

Medidores de vazão
seepage / erosão interna

Marcos / GNSS
deslocamentos superficiais

Inclinômetros
deformação interna

Radares / estações totais
deformação contínua

Sismógrafos
resposta dinâmica

Valor agregado
Correlacionar respostas com chuva, nível do reservatório, obras e ciclos sazonais.

3. Automação e telemetria

O dado deixa de ser fotografia e passa a ser filme.

Sensor → Datalogger → Telemetria → Banco de dados → Dashboard → Alarme

Ganho
Menor latência, cobertura remota, rastreabilidade, alarmes em tempo próximo do real.

Risco
Automatizar dado ruim amplifica ruído. Sem QA/QC, curva bonita também engana.

4. Sensoriamento remoto: a barragem em escala territorial

Satélite, radar, drone e LiDAR ampliam o monitoramento para além da crista.



- **InSAR orbital**
- **Radar de solo**
- **Drones / fotogrametria**
- **LiDAR / nuvem de pontos**
- **Termografia**

Uso típico

Triagem de deformações, grandes carteiras, áreas de difícil acesso e verificação independente.

De limites a respostas: o papel dos TARPs

Limite sem consequência operacional é apenas uma linha no gráfico.

Verde	Amarelo	Laranja	Vermelho
normalidade	**atenção**	**alerta**	**emergência**
rotina	verificar tendência	investigar e preparar resposta	agir / comunicar / evacuar

“Monitoramento maduro liga parâmetro → limiar → responsável → prazo → evidência de fechamento.”

Dados não falam sozinhos: governança é o amplificador

A falha de monitoramento muitas vezes não é de sensor; é de processo.

QA/QC

calibração, manutenção, plausibilidade

Contexto

chuva, NA, operação, obras, inspeções

Rastreabilidade

quem viu, quando viu, onde resitrou, o que decidiu

Integração

instrumentos + inspeções + modelos

Cultura

revisão periódica e questionamento técnico

5. IA no monitoramento preditivo

A IA não substitui o engenheiro: ela aumenta a capacidade de perceber padrões fracos.



O que a IA pode fazer

Detectar anomalias e padrões, estimar tendência, correlacionar variáveis, priorizar inspeções e apoiar diagnóstico probabilístico.

O que ela não deve fazer sozinha

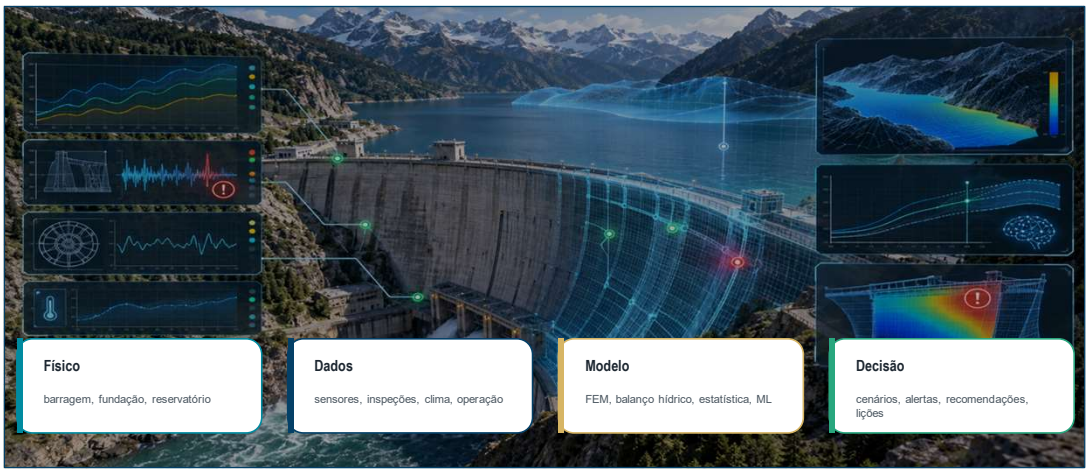
Declarar segurança, mudar TARP ou recomendar evacuação sem validação técnica de um profissional habilitado e governança.

Cuidado central

Explicabilidade, qualidade dos dados, drift do modelo e responsabilidade pela decisão.

Digital Twins: a próxima camada de maturidade

Um gêmeo digital conecta dado observado, modelo físico e previsão de comportamento.



Smart Dams: integração em tempo real, automação e operação

O exemplo chinês em hidrelétricas aponta para redes de sensores + dados + modelos + resposta operacional.



A arquitetura que sustenta o futuro

O monitoramento preditivo exige cadeia de dados de ponta a ponta.

Campo
sensores • inspeção • drone

Conectividade
rádio • 4G/5G • satélite

Dados
histórico • QA/QC • contexto

Analytics
limiares • ML • modelos físicos

Operação
TARP • comunicação • ação

O papel humano fica mais nobre, não menor

Tecnologia aumenta o alcance; responsabilidade técnica continua humana.



- Perguntar melhor
- Interpretar fisicamente
- Decidir sob incerteza
- Comunicar com clareza
- Aprender com eventos

“O futuro é híbrido: sensores mais atentos, modelos mais rápidos e engenheiros mais estratégicos.”

Conexão com os três artigos selecionados

A mesa aprofunda exatamente os próximos passos desta evolução.

Artigo 1 • Digital Twins

Como representar a barragem no ambiente digital para simular, comparar e antecipar comportamento?

Artigo 2 • Smart Dams

Quais os próximos passos e desafios para a engenharia geotécnia e de computação?

Artigo 3 • Modernização de Instrumentação de Barragens

Qual o limiar e sequenciamento para o monitoramento preditivo?

"Minha provocação para os autores: qual decisão a tecnologia melhora — e como comprovamos isso?"

Monitorar é transformar incerteza em decisão.



O futuro do monitoramento geotécnico não será medido pela quantidade de sensores, mas pela qualidade das respostas que conseguimos acionar antes do risco se materializar.

Obrigado

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

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.4
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

APRENDIZADO DE MÁQUINA APLICADO AO MONITORAMENTO SISMOLÓGICO DE BARRAGENS

Walter CÁRDENAS
Doutor – GeoOndas Ltda.

Edgar R. S. RONDAN
Doutor – GeoOndas Ltda.

Cristóbal CONDORI
Prof. Doutor – UNSA – GeoOndas Ltda.

Ricardo M. VILHENA
Engenheiro Geólogo – AXIA Energia.

RESUMO

Apresenta-se um sistema híbrido para segurança de barragens que integra métodos sísmicos clássicos e aprendizado de máquina. O fluxo computacional automatiza a detecção, caracterização, localização e catalogação de eventos em redes locais limitadas, cenário comum na mineração e no setor hidrelétrico brasileiro. Inicialmente, o método STA/LTA realiza a triagem inicial e o recorte de potenciais eventos, cujas fases P e S são identificadas pelo modelo pre-treinado *EQTransformer*. A localização epicentral baseia-se no método *Single-Station Location*, aqui estendido por ponderação multibanda segundo a dependência espectral da direção de polarização. Consequentemente, o sistema otimiza faixas de frequência com maior relação sinal-ruído, mitigando interferências isoladas para refinar o retroazimute. Essa abordagem melhora a confiabilidade das classificações, reduz falsos positivos e opera em tempo quase real. A implementação baseada em bibliotecas consolidadas de aprendizado de máquina, como o *SeisBench*, automatiza o processo de *picking*, permitindo o processamento contínuo, desde a localização dos eventos e a geração automática de catálogos auditáveis. Além disso, a integração com ferramentas de inspeção visual, tais como mapas interativos em HTML e *Snuffler*, otimiza a validação por especialistas. Testado com dados da UHE Serra da Mesa, o método apresentou resultados promissores. O potencial de *fine-tuning* da rede neural artificial com dados proprietários reforça sua aplicação em sistemas de alerta precoce, gestão de riscos e segurança de barragens.

ABSTRACT

A hybrid system for dam safety that integrates classical seismic methods and machine learning is presented. The computational workflow automates the detection, characterization, location, and cataloging of events in limited local

networks, a common scenario in the Brazilian mining and hydroelectric sectors. Initially, the STA/LTA method performs the preliminary screening and windowing of potential events, whose P and S phases are identified by the pre-trained EQTransformer model. Epicentral location is based on the Single-Station Location method, here extended by multi-band weighting according to the spectral dependence of the polarization direction. Consequently, the system optimizes frequency bands with higher signal-to-noise ratios, mitigating isolated interferences to refine the backazimuth. This approach improves classification reliability, reduces false positives, and operates in near real-time. The implementation based on consolidated machine learning libraries, such as SeisBench, automates the picking process, enabling continuous processing from event location to the automatic generation of auditable catalogs. Furthermore, integration with visual inspection tools, such as interactive HTML maps and Snuffler, optimizes specialist validation. Tested with data from the Serra da Mesa Hydroelectric Power Plant (UHE), the method yielded promising results. The potential for fine-tuning the artificial neural network with proprietary data reinforces its application in early warning systems, risk management, and dam safety.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento sísmico desempenha um papel essencial para a avaliação contínua da segurança de barragens e de estruturas geotécnicas, especialmente em cenários nos quais ocorrem eventos sísmicos induzidos por atividades humanas, como operações hidráulicas, enchimento de reservatórios e alterações no estado de tensões do maciço rochoso, associadas à mineração [1,2,3]. Além de permitir a detecção precoce de eventos sísmicos de baixa magnitude, esse monitoramento contribui para a caracterização do comportamento dinâmico do meio geológico, e fornece informações fundamentais para a análise da resposta estrutural e para a avaliação da ameaça sísmica. Dessa forma, o monitoramento sísmico desempenha um papel estratégico na gestão de riscos, na tomada de decisão para garantir a segurança operacional de empreendimentos de alta responsabilidade civil.

Este trabalho apresenta um algoritmo computacional aplicado ao monitoramento de barragens e estruturas geotécnicas. O algoritmo integra métodos clássicos de processamento sísmico, como o modelo STA/LTA (*Short-Term Average/Long-Term Average*) [4,5,6] para a detecção e o modelo SSL (*Single-Station Location*) [7,8] para a localização de eventos e modelos de aprendizado de máquina, implementados por meio de redes neurais artificiais da biblioteca *SeisBench* [9], tais como o *PhaseNet* [10] ou o EQT (*EQTransformes)* [11] utilizados para a identificação automática das fases (*picking)*.

Essa abordagem híbrida proposta combina métodos clássicos com critérios físicos e estatísticos consolidados na literatura, os quais, apesar dos avanços recentes nessa área, apresentam ainda limitações em ambientes geológicos com baixa relação sinal-ruído. Nesse contexto, modelos baseados em aprendizado de máquina são empregados de modo a reduzir as incertezas encontradas na análise do comportamento dos dados sismográficos sob diferentes condições operacionais com o objetivo de ampliar a robustez na detecção, classificação e localização de eventos sísmicos.

A implementação de métodos automatizados e baseados em bibliotecas validadas, como o *SeisBench*, traz como vantagens o processamento de um fluxo contínuo de dados em tempo real, permitindo o cálculo quase instantâneo da localização, magnitude e catalogação. O que proporciona um sistema de alerta precoce mais ágil, essencial para a gestão de riscos e segurança de barragens. Além disso, o sistema garante a consistência do critério de marcação das fases P (Primária) e S (Secundária) em todos os eventos, reduzindo a influência de erros humanos e de vieses interpretativos, facilitando o processo de auditoria e o cumprimento de normas de segurança uma vez que cada detecção pode ser rastreada e auditada com base em parâmetros claramente definidos.

O algoritmo proposto automatiza a detecção, caracterização e localização de eventos sísmicos relevantes para a avaliação do perigo sísmico e do comportamento estrutural de barragens. Na etapa inicial do algoritmo, os dados da componente vertical (*Z*) do sismograma são analisados pelo método STA/LTA, que realiza uma triagem preliminar para a seleção e extração de janelas sísmicas que contêm o possível evento sísmico. Em seguida, são realizadas etapas de pré-processamento nas janelas com os dados sísmicos das três componentes, nas quais será realizado o *picking* das fases sísmicas P e S através dos modelos de redes neurais artificiais.

O modelo SSL [7] foi estendido para uma abordagem de ponderação multibandas, para explorar a dependência espectral na análise de polarização do sinal sísmico. Essa técnica aumenta a robustez contra ruídos sísmicos na formação da matriz de covariância, gerada a partir de uma janela temporal que isola a fase P. A partir da decomposição dessa matriz, obtêm-se os autovalores e autovetores utilizados para determinar o retroazimute. Com base em uma validação baseada em modelos de velocidades regionais [12,13], estima-se a distância hipocentral e, consequentemente, a localização epicentral do evento por meio de relações de trigonometria esférica. Adicionalmente, por meio da parametrização do tempo de decaimento do sinal, obtém-se a magnitude de duração, m_D [14].

Essa extensão do método SSL clássico confere ao fluxo desenvolvido vantagens qualitativas importantes frente a outras abordagens de estação única encontradas na literatura:

- Frente a modelos baseados em Redes Neurais Diretas (*End-to-End*): Embora arquiteturas profundas recentes procurem prever diretamente a localização a partir da forma de onda bruta, elas operam como caixas-pretas de difícil calibração. O fluxo aqui proposto preserva critérios físicos claros e auditáveis, facilitando aprovações regulatórias.
- Frente a Métodos Probabilísticos Bayesianos: Abordagens probabilísticas exigem alto poder computacional para gerar mapas de incerteza espacial. O algoritmo apresentado atinge respostas em tempo quase real com baixo custo computacional, ideal para sistemas de alertas locais.
- Frente ao SSL clássico: O SSL tradicional calcula atributos em uma banda de frequência fixa, tornando-se vulnerável a ruídos isolados. A ponderação multibanda desenvolvida mitiga essas interferências locais ao privilegiar as faixas com maior relação sinal-ruído.

O código correspondente foi desenvolvido na linguagem Python [15] utilizando bibliotecas científicas de código aberto (*open-source)* amplamente utilizadas; Entre as principais bibliotecas utilizadas destacam-se *Numpy* [16], *Scipy* [17], *ObsPy* [18], *SeisBench* [9], *Pandas* [19], *Snuffler* [20] e *Folium* [21].

1.1 Fundamentos Teóricos Clássicos

A seguir, são apresentados os principais fundamentos teóricos implementados em linguagem Python [15]. Esses fundamentos operacionalizam conceitos geofísicos em critérios práticos do projeto para a análise, caracterização e localização dos eventos sísmicos, baseando-se nos princípios geométricos e estatísticos descritos nas seções seguintes.

1.1.1 Triagem usando o Modelo STA/LTA

Desde os trabalhos de Withers et al. [4] e Trnkoczy [5], o algoritmo STA/LTA tem sido implementado como uma triagem inicial para a seleção e corte de janelas contendo potenciais eventos sísmicos. O método baseia-se na identificação de variações súbitas nos níveis de amplitude ou energia do sinal sismológico da componente vertical *Z* em relação ao ruido de fundo, assumido como estatisticamente estacionário.

Essas variações são monitoradas continuamente por duas janelas deslizantes de diferentes larguras temporais em uma amostra: a janela de curto prazo ($STA_{(t)}$), sensível a impactos rápidos e transientes, e a janela de longo prazo ($LTA_{(t)}$), que estima o nível do ruído de fundo. A decisão de seleção e corte é ativada no instante em que a razão escalar instantânea (gatilho) supera o limiar predefinido, conforme a expressão:

$$r_{(t)} = STA_{(t)} / LTA_{(t)} \geq r_{on} \tag{1}$$

Quando esse critério é atendido, o sistema identifica o início do evento sísmico e isola o trecho correspondente para as análises subsequentes.

1.1.2 Matriz de Covariança, Análise de Polarização e "Features" do Sinal

A geometria do movimento da partícula e as informações essenciais para a localização e caracterização do evento sísmico são obtidas a partir da construção da matriz de covariância C e de sua posterior decomposição. Assim, a partir da equação característica, determinam-se os autovalores λ (que representam a energia distribuída) e os autovetores v (que definem as direções de incidência). A matriz de covariância é estruturada selecionando-se os dados contidos em uma janela temporal reduzida ao redor da fase P das três componentes ortogonais: *Z* (vertical), *N* (norte) e *E* (leste):

$$Z = \left[z_{t_1}, z_{t_2}, \ldots, z_{t_P}, \ldots, z_{t_{q-1}}, z_{t_q} \right] \tag{2}$$

$$N = \left[n_{t_1}, n_{t_2}, \ldots, n_{t_P}, \ldots, n_{t_{q-1}}, n_{t_q} \right] \tag{3}$$

$$E = \left[e_{t_1}, e_{t_2}, \ldots, e_{t_P}, \ldots, e_{t_{q-1}}, e_{t_q} \right] \tag{4}$$

Nas equações acima, t_1 e t_q são respectivamente as posições temporais das amostras inicial e final, e t_p é a amostra que define a posição da fase P.

Assim, extraindo as médias: $\bar{z}, \bar{n}, \bar{e}$, de cada componente (por exemplo na componente Z: $\widetilde{Z} = Z - \bar{z}$), e organizando os dados na forma matricial: $\widetilde{X} = \left[\widetilde{Z}\,\widetilde{N}\,\widetilde{E}\right]$, a matriz de covariância é construída desde a equação:

$$\mathrm{C} = \frac{1}{q-1}\widetilde{X}^T\widetilde{X} \tag{5}$$

A matriz de covariância, Eq. (5), é uma ferramenta estatística que avalia a distribuição e a correlação de energia entre as componentes do movimento do solo. Ela sinaliza a direção na qual a energia do solo está se deslocando preferencialmente. Os seus autovalores λ são obtidos resolvendo a equação característica:

$$det\left(C - \lambda I\right) = 0 \tag{6}$$

Desse modo, obtêm-se um conjunto de autovalores $\lambda_{i=1,2,3}$, o qual representa a quantidade de energia contida no tremor. Assim, resolvendo o sistema linear para cada autovalor:

$$\left(C - \lambda_i I\right) v_i = 0 \tag{7}$$

Obtêm-se os autovetores $v_i = \left[v_{i,Z}\, v_{i,N}\, v_{i,E}\right]$ correspondentes a cada autovalor λ_i.

Considerando λ_1 o autovalor de maior intensidade energética, seu autovetor correspondente $v_1 = \left[v_{1,Z}\, v_{1,N}\, v_{1,E}\right]$ determina exatamente a direção geométrica tridimensional dominante de propagação da onda P.

O valor do retroazimute, $\left(B\right)$, é obtido da relação:

$$\mathrm{B} = \tan^{-1}\left(\frac{v_{1,E}}{v_{1,N}}\right) \tag{8}$$

O retroazimute indica a direção geográfica bússola (ex. Nordeste, Sudoeste) de onde veio a onda sísmica em relação à estação.

Considerando: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$, alguns parâmetros caraterísticos do sinal, *features*, podem ser obtidas, tais como [7,22]:

- Linearidade (L); mede quanto a vibração do solo se assemelha a uma linha reta perfeita. Seu valor varia entre 0 e 1. Para uma onda P, espera-se uma linearidade alta, geralmente acima de 0,7, pois a onda empurra e puxa o solo em uma direção linear bem definida. Valores próximos a 0 indicam que a energia está dispersa de forma esférica ou caótica:

$$\mathrm{L} = 1 - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \tag{9}$$

- Planaridade (P); mede quanto a vibração fica restrita a uma superfície plana bidimensional. Seu valor varia entre 0 e 1. Ondas S e ondas de superfície tendem a apresentar planaridade mais alta (acima de 0,6) se comparadas à onda P, pois oscilam de forma perpendicular ou elíptica contidas em um plano geométrico de propagação:

$$P = 1 - \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2} \right) \tag{10}$$

- Elipticidade (E); mede o grau de achatamento do movimento elíptico da partícula de solo. Varia entre 0 e 1. Valores baixos (próximos a 0) indicam movimento puramente retilíneo (predomínio da onda P). Valores mais elevados (próximos a 1) indicam orbitas elípticas abertas, comportamento altamente característico de ondas superficiais de *Rayleigh* ou ruídos contínuos gerados por maquinários industrias:

$$E = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1} \tag{11}$$

- Ângulo de incidência (θ); indica a inclinação vertical com que o raio sísmico emerge e atinge o sensor. Varia entre 0^0 e 90^0. Para eventos sísmicos locais e profundos ocorrendo abaixo da estação, a onda P atinge o sismógrafo subindo quase vertical, resultando em ângulos baixos (geralmente abaixo de 30^0). Eventos muitos distantes (telessismos) ou ruídos que viajam superficialmente pela crosta tendem a registrar ângulos de incidência elevados, aproximando-se de 90^0:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{v_{1,N}^2 + v_{1,Z}^2}}{|v_{1,Z}|} \right) \tag{12}$$

- Curtose (K); é utilizado como um indicador de impacto do sinal. Transições abruptas entre o ruído estacionário de fundo e o início súbito de um evento sísmico geram picos elevados de curtose, marcando o caráter impulsivo do sismo:

$$K = \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)^2} \tag{13}$$

No código desenvolvido, esses *features* geométricos são extraídos continuamente e integrado às regras de decisão automatizadas para a parametrização, classificação e consolidação do catálogo preliminar de eventos monitorados na estrutura da barragem.

1.2 Algoritmo Computacional

O algoritmo computacional deste código foi desenvolvido em Python, com o uso de bibliotecas de código aberto (*open-source)* amplamente consolidadas nos meios científico e tecnologia da informação. Entre as principais, destacam-se: *NumPy* e *SciPy*, para cálculo numérico; *ObsPy*, para o processamento de dados sismológicos; *SeisBench*, voltada ao *picking* automatizado das fases P e S; *Pandas*, para manipulação e estruturação de catálogos; *Snuffler*, para inspeção visual de janelas de eventos; e *Folium*, para visualização geoespacial. Essas ferramentas são essenciais para a automação do monitoramento e da análise da atividade sísmica, seja ela natural ou induzida por atividades em áreas de barragens e mineração com redes locais limitadas. O objetivo central é avaliar o perigo sísmico e o comportamento estrutural dessas estruturas.

A seguir, a Figura 1 apresenta um fluxograma com as principais fases do código. As seções subsequentes descrevem as etapas mais relevantes do processamento de sinal, desde a leitura inicial dos dados até a geração do catálogo sísmico preliminar.

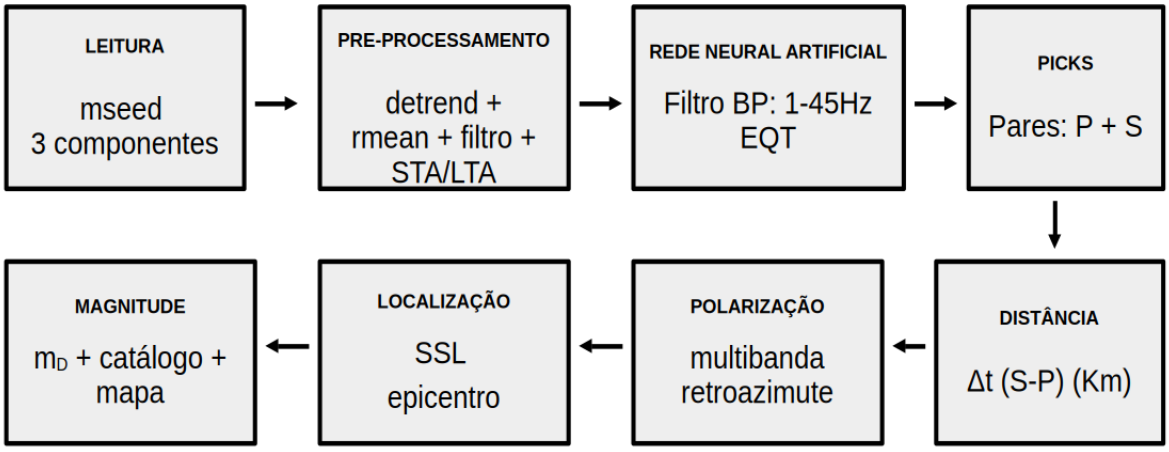


Figura 1 – Fluxograma do processamento de dados, ilustrando o fluxo desde a leitura das janelas contendo os possíveis eventos detectados por meio do algoritmo STA/LTA até a geração do mapa de localização dos eventos e do catálogo preliminar.

1.2.1 Pré-processamento e Triagem

Em uma primeira abordagem do sinal sismológico, é feita a leitura das três componentes dos dados sismográficos, de modo a garantir a sincronização temporal das amostras e a remoção de tendências e da média dos dados. Para a triagem, é aplicado um filtro passa-alta (0,6 Hz). Utilizando os dados da componente Z, janelas de até dois minutos de duração são selecionadas e recortadas sempre que a razão $r_{(t)}$ supere o limiar $\left(r_{on}\right)$ estabelecido.

1.2.2 Picking via Redes Neurais Artificiais

Os dados das três componentes das janelas selecionadas são normalizadas e processadas aplicando um filtro passa-banda de 1–45 Hz. Na sequência, os sinais são analisados pelo modelo, neste trabalho, pela rede neural profunda EQT [11] para a identificação e o *picking* automatizado das fases P e S.

O EQT é uma arquitetura de inteligência artificial complexa composta por 22 camadas que combina redes convolucionais com mecanismos de atenção e redes recorrentes LSTM (*Long Short-Term Memory*) [11]. O uso de mecanismos de atenção permite que o modelo foque em partes específicas da forma de onda, ignorando o ruído ambiental. O modelo realiza três tarefas simultâneas através de ramos de saída distintos: detecção da presença do evento, *picking* da fase P e *picking* da fase S. Sendo muito eficaz na separação entre ruído sísmico e micro-eventos.

No código, o processamento via EQT emprega janelas deslizantes de 60 segundos com intervalos de sobreposição, garantindo a continuidade da análise e mitigando o risco de perda de eventos nas transições dos segmentos. A validação e aceitação do *picking* é condicionada a limiares mínimos de probabilidade; uma detecção é registrada apenas quando a predição do modelo excede um valor nominal de confiança preestabelecido.

1.2.3 Ponderação Multibandas de Frequências

Considerando que a energia dos eventos sísmicos (naturais ou induzidos) e do ruído ambiental distribui-se de forma distinta no espectro de frequências, foi desenvolvido o método de ponderação multibandas de frequências. Essa técnica consiste em decompor o sinal original em diferentes faixas de frequência através de filtros digitais, permitindo que o retroazimute e os *features* sejam calculadas de forma independente para cada banda.

Deste modo, para cada banda de frequência f filtrado, obtêm-se uma matriz de covariância local (C_f), gerando valores do retroazimute e *features* específicas de aquela banda.

A métrica ponderada final (M_{total}) é obtida através da soma do produto de cada métrica individual (m_f) pelo seu respectivo peso (w_f), que é proporcional à energia ou à variância daquela banda (f) :

$$M_{total} = \frac{\sum_{f=1}^{N} m_f w_f}{\sum_{f=1}^{N} w_f} \tag{14}$$

Onde N é o número de bandas. O peso (w_f) pode ser definido pela contribuição relativa do maior valor do autovalor (λ_1) de cada banda f:

$$w_f = \frac{\lambda_{1,f}}{\sum_{j=1}^{N} \lambda_{1,j}} \tag{15}$$

No caso específico do retroazimute ponderado (B_P), utiliza-se a soma vetorial dos autovetores dominantes em cada banda de frequências (v_1^f) ponderados pela energia de cada banda:

$$V^p = \sum_{f=1}^{N} w_f . v_1^f \tag{16}$$

$$B_P = \tan^{-1}\left(\frac{V_E^p}{V_N^p}\right) \tag{17}$$

Em que V_N^p e V_E^p são as componentes norte e leste do vetor resultante ponderado V^p . Essa abordagem garante que bandas de frequências com maior relação sinal-ruído tenham maior influência na localização final do evento, o que aumenta a robustez na estimativa do retroazimute e das *features* obtidas da polarização. No caso só do retroazimute, foi implementado a resolução de ambiguidade de 180^0 utilizando o primeiro movimento da componente *Z*.

1.2.4 Localização Epicentral

A localização epicentral a partir de uma única estação é estimada projetando-se o retroazimute (B_P) e a distância epicentral $D(km)$ a partir das coordenadas

conhecidas do sismógrafo. Inicialmente, o intervalo de tempo entre as fases S e P (Δ_{SP}) é extraído do sinal. Esse delta de tempo é convertido em distância horizontal utilizando o módulo *Cake* da biblioteca *Pyrocko*, que resolve analiticamente as trajetórias de raios sísmicos em modelos de Terra estratificados unidimensionais.

Para essa conversão, incorpora-se um modelo de velocidades otimizado para o cenário brasileiro. O modelo simula uma crosta superior com $V_P = 6{,}20\,km/s$ e $V_S = 3{,}58\,Km/s$ até 20 *Km* de profundidade, uma camada intermediária até 40 *Km*, e o manto superior a partir da descontinuidade de Moho (fixada em 40 *Km*) com $V_P = 8{,}0\,km/s$ e $V_S = 4{,}50\,Km/s$ [12]. No algoritmo, a profundidade focal do evento é assumida como constante (10 *Km*). O regime de propagação das ondas é automaticamente diferenciado entre local (P_g / S_g) ou regional (P_n / S_n) com base na distância de cruzamento calculada em função da espessura da Moho.

Conhecidas a latitude (Lat_{est}) e longitude (Lon_{est}) da estação sismográfica, aplicam-se aproximações trigonométricas planas para determinar as coordenadas geográficas do epicentro,

$$Lat_{epi} = Lat_{est} + \left(\frac{D}{111{,}19}\right)\cos\left(B_P\right) \tag{18}$$

$$Lon_{epi} = Lon_{est} + \left(\frac{D}{111{,}19\,\cos\left(Lat_{est}\right)}\right)\sin\left(B_P\right) \tag{19}$$

Onde o fator *111,0* representa a conversão aproximada de quilômetros para graus no arco terrestre local.

Para o cálculo da magnitude, adota-se o método da magnitude de duração (m_D), amplamente aplicável a eventos de baixa e média magnitude nas sub-regiões brasileiras. A equação empírica implementada baseia-se na duração da onda correspondente ao tempo de persistência da coda analítica (*D*, em segundos) [14]:

$$m_D = C_1 + C_2 \log\left(D\right) \tag{20}$$

Onde as constantes calibradas são $C_1 = -1{,}61$ e $C_2 = 2{,}05$. O tempo de duração (*D*) é mensurado estritamente na componente *Z* do sismograma. Ele compreende o intervalo entre a chegada da onda P até o ponto em que o envelope suavizado do sinal decai e intercepta o limiar do ruído de fundo instrumental.

1.2.5 Classificação dos Eventos Sísmicos

O algoritmo utiliza uma lógica de decisão baseada na atribuição de pesos para classificar os eventos detectados em: Naturais (Tectônicos), Explosões ou Induzidos, a classificação será detalhada na Seção 2.4. Esse processo ocorre por meio da análise discriminante de atributos sísmicos, com destaque para a razão de energia entre as fases P e S, a frequência dominante e as *feature*s derivadas da análise de polarização. Essa abordagem multifatorial eleva a confiabilidade na distinção entre fontes naturais e atividades antropogênicas.

1.2.6 Catálogo e Visualização dos Eventos Detetados

Os resultados processados são consolidados em um catálogo em formato CSV, contendo os parâmetros do tempo de chegada das fases P e S, probabilidades de aceitação das fases, localização, *features* e magnitudes. Para a análise geoespacial, o código gera mapas interativos em formato HTML utilizando a biblioteca *Folium* [21], permitindo a visualização dinâmica dos epicentros. Adicionalmente, o código exporta arquivos de marcadores compatíveis com o módulo *Snuffler* da biblioteca *Pyrocko* [20], facilitando a inspeção visual e o refinamento dos eventos, conforme será mostrado na seguinte seção.

2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir do processamento dos dados de sismicidade registrados pelas estações sismográficas da Usina Hidrelétrica (UHE) de Serra da Mesa (Figura 2). O fluxo de trabalho da análise automatizada abrange desde o *picking* automatizado das fases sísmicas até a análise espacial dos eventos e a consolidação do catálogo preliminar.

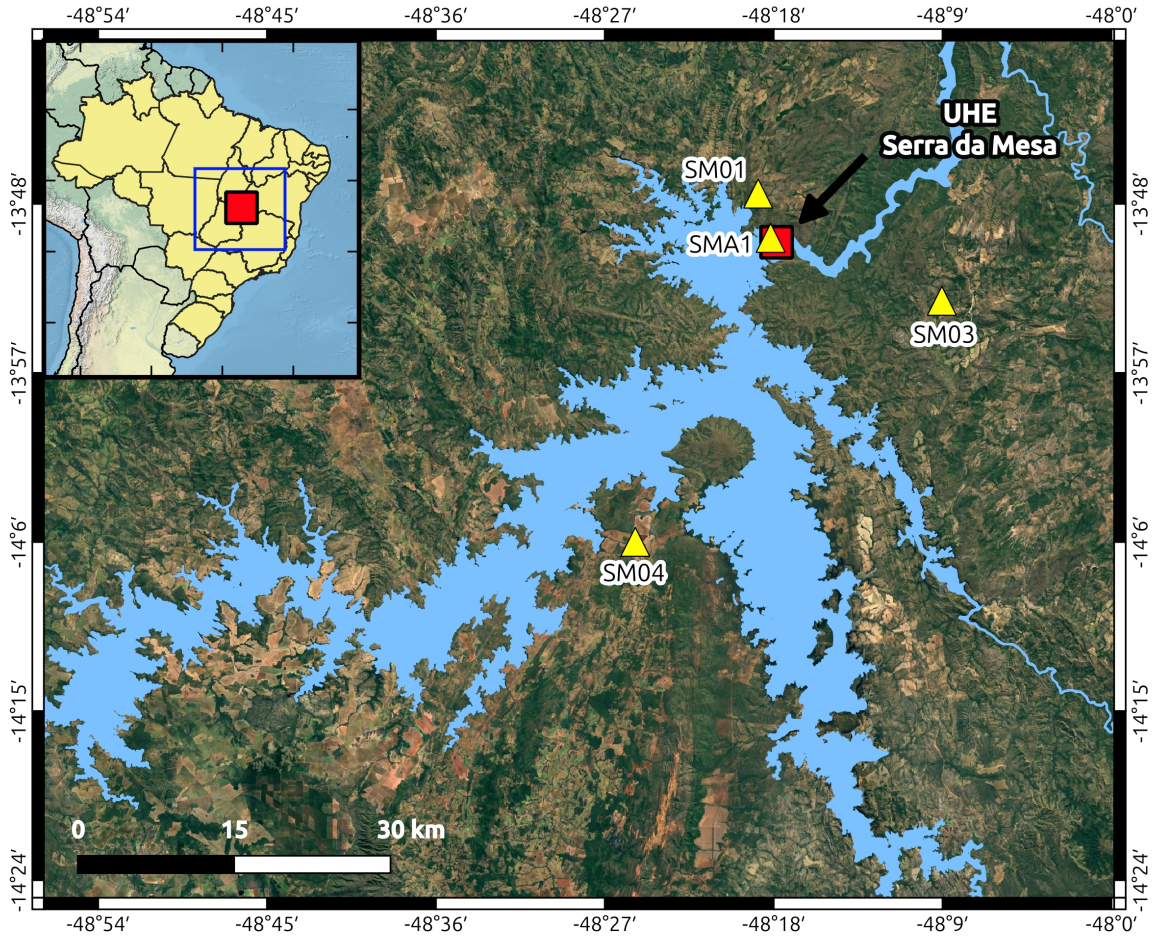


Figura 2 – Mapa do reservatório de Serra da Mesa com as localizações das unidades sismográficas da UHE Serra da Mesa (triângulos).

2.1 *Picking* automatizado das Fases P e S

A integração com o software *Snuffler* via *script shell* foi realizada para importar o arquivo de marcadores contendo o registro do *picking* automatizado das fases P e S. Essa etapa utilizou a rede neural artificial EQT, a qual estima, para cada janela com gatilho acima do limiar estabelecido, as probabilidades de identificação das fases detectadas. Os sismogramas da Figura 3 ilustram os *picks* gerados automaticamente pelo modelo, registrando as respectivas probabilidades acima do valor nominal de confiança estabelecido para as fases P e S. Por se tratar de uma rede pré-treinada, adotou-se um valor nominal relativamente baixo de 10% para a aceitação das fases. O algoritmo foi configurado para que, caso dois eventos muito próximos (em um intervalo de até 8 s) sejam detectados, apenas aquele com maior valor de probabilidade seja registrado. Além disso, o EQT analisa janelas de 60 s; assim, para recortes de sismogramas com extensão de 120 s, configurou-se uma leitura iterativa de 60 s com sobreposição de 30 s. O *picking* automatizado do evento apresentado na Figura 3 foi registrado pela estação SM01 da UHE de Serra da Mesa no dia 20/04/2018. O algoritmo detectou a chegada da onda P às 14:18:57.47 e da onda S às 14:19:01.42. Esse mesmo evento foi analisado e catalogado como "evento 6" na Tabela 4 do relatório semestral (janeiro-junho) da Ref. [23]. A imagem da análise contida no referido relatório é apresentada na Figura 4. Conforme os dados do relatório [23], os tempos de chegada foram registrados originalmente às 14:18:56.50 e às 14:18:59.30 para as ondas P e S, respectivamente.

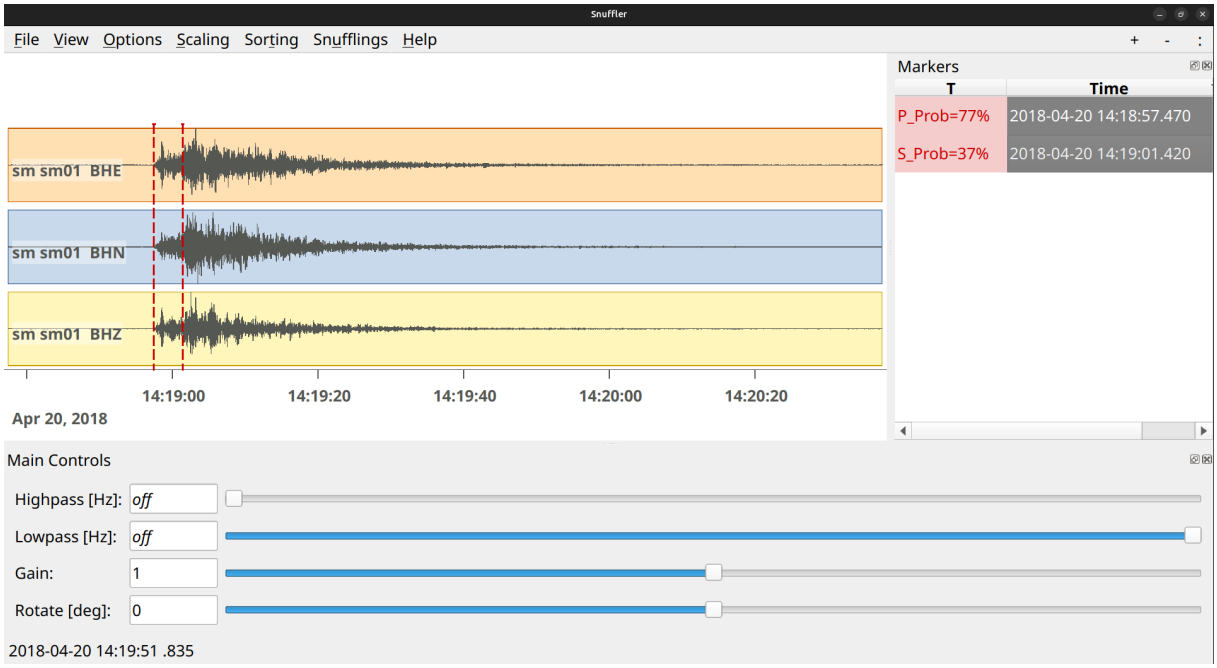


Figura 3 – Exemplo de *picking* automatizado das fases P e S realizado pelo modelo de rede neural profunda EQT para o evento de 20/04/2018, visualizado no módulo *Snuffler.* O sismograma destaca os tempos de chegada calculados na estação SM01 (fase P às 14:18:57.47 e fase S às 14:19:01.42) com suas respectivas probabilidades de confiança de 77% e 37%.

A Tabela 1 lista os tempos de chegada da onda P dos eventos registrados e analisados no relatório semestral [23]. Em comparação com os tempos de chegada da fase

P obtidos através da rede neural EQT mostraram-se bastante satisfatórios. Similar comportamento foi apreciado para a onda S.

Tabela 1 – *Apresenta-se uma comparaç*ão entre os tempos de chegada da fase P (Ref. [23]) e os resultados gerados pelo modelo pré-treinado EQT.

N^0	Tab. [23]	N^0 Evento [23]	Data	Hora (UTC) [23]	EQT-Fase P	EQT-Fase S	Estação
1	4	1	04/01/18	19:25:07.60	19:25:07.95	19:25:20.70	SM04
2	3	11	17/01/18	14:31:15.40	14:31:17.37	14:31:33.74	SM03
3	3	80	17/03/18	20:28:32.80	20:28:26.51	20:28:35.57	SM01
4	4	5	20/03/18	19:47.56.00	19:47:58.57	19:48:13.25	SM04
5	3	112	13/04/18	21:07.23.70	21:07:23.38	21:07:45.62	SM03
6	4	6	20/04/18	14:18:56.50	14:18:57.47	14:19:01.42	SM01
7	3	119	26/04/18	20:25:26.80	20:25:25.99	20:25:56.02	SM03

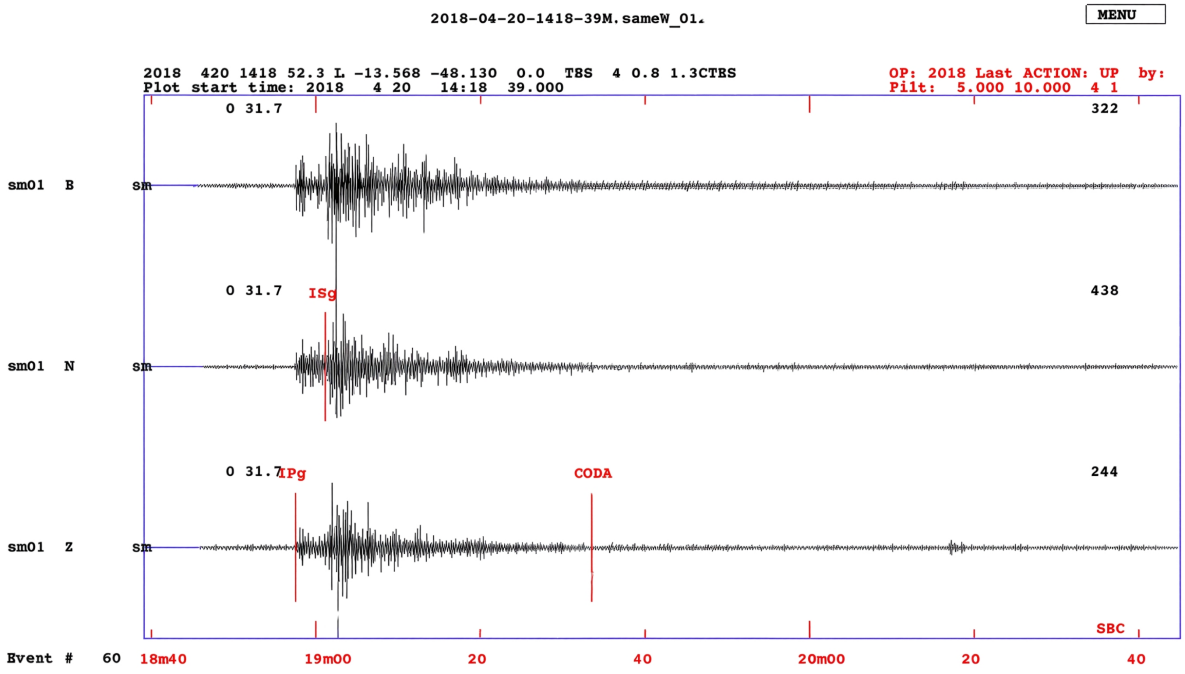


Figura 4 – Registro sismográfico e análise manual do evento sísmico de 20/04/2018 (apresentado na Fig. 3) obtidos a partir do relatório semestral da estação SM01 da UHE de Serra da Mesa [23]. A imagem é utilizada como base comparativa para a validação dos tempos de chegada das ondas P (14:18:56.50) e S (14:18:59.30) identificados originalmente por especialistas.

2.2 Localização e Análises Espaciais

Para a visualização e análise espacial dos dados, utilizou-se a biblioteca *Folium* para a geração de um mapa global interativo e acumulado. Essa ferramenta permite plotar e explorar geograficamente todos os eventos sísmicos detectados ao longo de uma campanha realizada por uma única estação. A integração dessa visualização com modelos de redes neurais artificiais para detecção e leitura de fases, como o EQT, potencializa a análise de sismicidade local. Devido à sua alta sensibilidade, o EQT é capaz de identificar microeventos com baixa relação sinal-ruído que frequentemente passariam despercebidos pela análise visual humana. Como consequência, a detecção massiva e precisa desses microeventos viabiliza o mapeamento detalhado de falhas geológicas ativas, refinando a compreensão da sismotectônica da região estudada.

Utilizando essa metodologia, analisaram-se os dados contínuos da estação SM04 referentes ao dia 2 de abril de 2018. Enquanto o relatório semestral daquele período [23] registrava apenas um telessismo na Bolívia às 13:43 (UTC), com magnitude de 6,8 *Mw*, a aplicação do modelo EQT sobre os dados daquele dia em particular permitiu identificar 13 eventos adicionais, conforme detalhado na Figura 5.

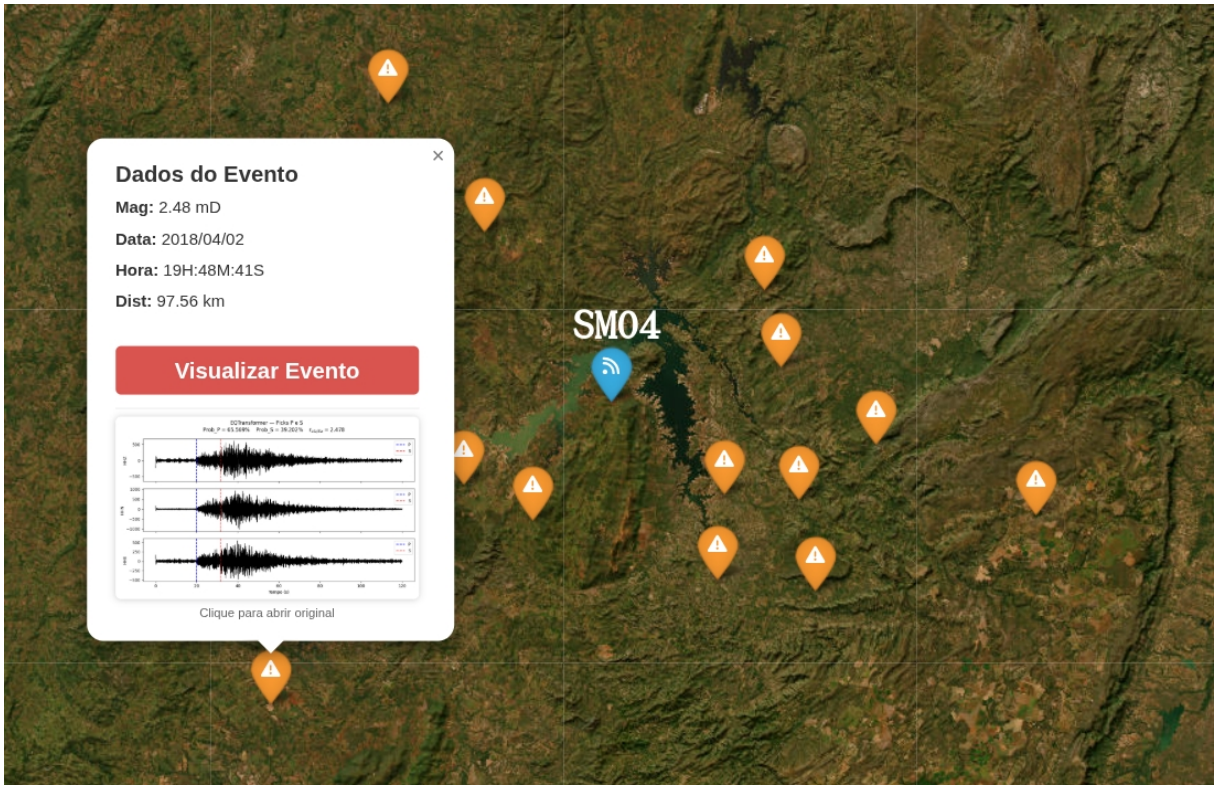


Figura 5 – Interface interativa em HTML gerada pelo código, exibindo a distribuição espacial dos eventos detectados em relação à estação sismográfica SM04, no dia 2 de abril de 2018. Na figura destaca-se um evento inédito identificado pela rede neural artificial.

A distribuição espacial revela uma clara proximidade dos eventos em relação ao reservatório e às principais estruturas geológicas da região. A análise visual confirmou a concentração dessa microssismicidade ao longo das zonas de falha, fornecendo

subsídios fundamentais para avaliar o impacto da variação do nível da água do reservatório na atividade sísmica local (Sismicidade Induzida por Reservatório).

A partir da Figura 5, destaca-se a detecção inédita de um sismo às 19H:48M:41S a 97,56 km da estação SM04, o qual não constava no relatório semestral original [23], evidenciando a robustez e a superioridade do sistema proposto na ampliação do catálogo sísmico da região.

2.3 Catálogo de Eventos Sísmicos

O processamento dos dados de sismicidade apresentados na Figura 5 resultou em um catálogo contendo 13 eventos inéditos detectados em 02/04/2018 pela estação SM04. Na Figura 6, apresenta-se o catálogo gerado pelo algoritmo, que resume as principais *features* de cada evento, incluindo o tempo de chegada das ondas P e S, as probabilidades de confiança das fases, a localização e a magnitude, entre outros parâmetros.

Na Figura 6, destaca-se o evento 9, registrado às 13:43:49.52 com uma razão $STA/LTA = 6{,}33$. Embora seu epicentro tenha sido localizado preliminarmente em Cavalcante (GO), o evento corresponde, na realidade, a um telessismo com epicentro na Bolívia [23]. Essa discrepância decorre das limitações intrínsecas do método SSL, otimizado para eventos rasos e locais nos quais a onda P apresenta elevado grau de polarização. O comportamento anômalo do autovalor $\lambda_1 (\gg 1)$ degrada a capacidade do modelo SSL calcular o retroazimute correto a partir de uma única estação. Além disso, o cálculo da distância epicentral utiliza um modelo de velocidades que assume a propagação em camadas crustais superficiais, o que compromete a precisão para telessismos. Dessa forma, o trabalho comprova quantitativamente que, embora o SSL seja altamente eficaz para o monitoramento local, o comportamento anômalo das *features* auxilia na identificação e no tratamento segregado de telessismos, evitando distorções no catálogo final.

Nº	Data	Hora	Picking S	Lat.	Lon.	D	Mag.	λ1	r	Município/UF	Evento
1	02/04/18	01:05:42	01:05:46	-14,03	-48,08	37,30	2,48	4,18	1,08	Niquelandia/GO	Induzido/Outros
2	02/04/18	02:03:13	02:03:16	-14,28	-48,20	31,19	2,19	8,38	1,07	Niquelandia/GO	Induzido/Outros
3	02/04/18	02:17:31	02:17:36	-14,29	-48,05	45,36	2,49	2,68	0,64	Niquelandia/GO	Natural/Tectônico
4	02/04/18	03:03:08	03:03:13	-14,44	-48,21	44,58	2,37	3,85	0,83	Niquelandia/GO	Induzido/Outros
5	02/04/18	05:32:12	05:32:19	-14,18	-47,89	57,70	2,46	10,80	0,71	Cavalcante/GO	Induzido/Outros
6	02/04/18	06:09:00	06:09:07	-14,46	-48,02	59,59	2,42	15,54	0,81	Niquelandia/GO	Induzido/Outros
7	02/04/18	07:44:38	07:44:47	-13,52	-48,87	79,99	2,39	5,11	0,83	Porangatu/GO	Induzido/Outros
8	02/04/18	09:33:10	09:33:16	-13,92	-48,87	52,53	2,43	7,70	0,56	Porangatu/GO	Induzido/Outros
9	02/04/18	13:43:49	13:43:54	-13,88	-48,12	40,80	2,49	12199,51	6,33	Cavalcante/GO	Induzido/Outros
10	02/04/18	19:48:41	19:48:53	-14,68	-49,10	97,56	2,48	6,24	2,48	Uruacu/GO	Induzido/Outros
11	02/04/18	21:46:39	21:46:45	-13,77	-48,67	45,19	2,43	5,61	0,46	Porangatu/GO	Explosão
12	02/04/18	21:47:10	21:47:14	-14,26	-48,72	36,30	2,16	4,80	1,18	Niquelandia/GO	Induzido/Outros
13	02/04/18	21:54:45	21:54:48	-14,33	-48,58	30,52	2,48	3,85	0,68	Niquelandia/GO	Natural/Tectônico
14	02/04/18	23:04:10	23:04:21	-14,32	-47,58	94,22	2,49	3,17	1,48	Cavalcante/GO	Induzido/Outros

Figura 6 – Catálogo gerado automaticamente com as principais informações dos eventos sísmicos detectados em 02/04/2018 pela estação SM04. No catálogo são registrados os tempos de chegada das fases P e S, a localização estimada (latitude e longitude), a magnitude m_D, a distância (D), a razão *STA/LTA* (r), o Município/UF de referência e a classificação do tipo de evento.

O detalhamento da classificação dos eventos do catálogo, ilustrada na Figura 6, será abordado na seção seguinte.

2.4 Classificação e Discriminação de Fontes

Implementou-se uma regra de discriminação sísmica automatizada [24] fundamentada em um sistema de escore heurístico. Este sistema combina múltiplos *features* do sinal, como a razão de energia das fases P/S, frequência dominante e linearidade, para classificar os eventos em três categorias: Explosão, Natural/Tectônico e Induzido/Outros.

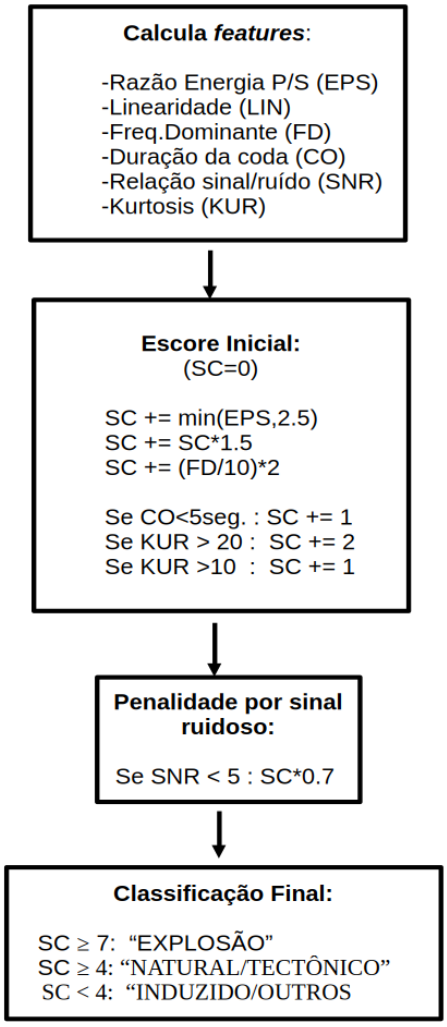


Figura 7 – Fluxo de classificação via escore heurístico. O sistema categoriza os eventos em três classes principais: (1) Explosão, definida pela soma de características de alta energia e frequência; (2) Natural/Tectônico, identificado pela assinatura temporal longa e linearidade; e (3) Induzido/Outros, que engloba sinais de baixa qualidade, fracos ou ruidosos.

A premissa central é que cada classe de evento apresenta assinaturas específicas no sinal sísmico, as quais o sistema identifica por meio da soma de evidências

ponderadas. A abordagem por escore (Figura 7) é adequada para cenários onde não se dispõe de volumes significativos de dados históricos rotulados, situação característica da sismicidade brasileira. A implementação exige a incorporação direta do conhecimento geofísico regional nos pesos do modelo, tornando-o facilmente auditável e ajustável por especialistas. Contudo, a definição empírica de limiares e pesos impõe limitações, podendo dificultar a generalização das características crustais locais.

Uma alternativa para aprimorar a categorização seria a utilização de árvores de decisão. Tais modelos permitiriam identificar automaticamente interações complexas entre variáveis, como a correlação entre uma curtose moderada e uma frequência dominante específica, que podem não ser evidentes em uma análise manual. Entretanto, diante da escassez de catálogos rotulados no monitoramento regional brasileiro, o sistema heurístico atual consolida-se como uma escolha pragmática e robusta.

Uma evolução natural seria usar o escore heurístico atual para gerar rótulos pseudo-automáticos em um catálogo grande e, posteriormente, treinar uma árvore de decisão sobre esses rótulos [25], validando-os com eventos confirmados por especialistas. Isso combinaria o conhecimento geofísico embutido no escore com a capacidade de generalização das árvores.

3. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um algoritmo híbrido para automatizar a detecção, a localização e o registro de eventos sísmicos. O sistema combina os métodos clássicos da sismologia com modelos pré-treinados de redes neurais artificiais. O objetivo é otimizar o processamento de dados provenientes de estações sismográficas brasileiras integradas a redes sísmicas de cobertura limitada, utilizando parâmetros crustais específicos de cada região geográfica.

O modelo SSL foi estendido para uma abordagem de ponderação multibanda, o que permite explorar a dependência espectral na análise da polarização do sinal sísmico. Essa técnica possibilitou isolar as frequências onde o sinal do evento predomina sobre o ruído, conferindo maior robustez à polarização por meio de uma média ponderada que favorece as faixas com maior relação sinal-ruído. Consequentemente, o parâmetro ponderado final assegura que os *features* do sinal e a estimativa do retro-azimute não sejam severamente afetadas por interferências localizadas em faixas espectrais isoladas, proporcionando uma classificação de eventos mais fidedigna através do método de escore heurístico.

Os resultados demonstram bom desempenho na identificação automatizada de eventos, com redução significativa de falsos positivos e capacidade de operação em tempo quase real. A integração entre modelagem física e inteligência artificial demostrou ser uma solução viável para reduzir as limitações impostas pela escassez de conjuntos de dados proprietários, demostrando robustez no monitoramento de ambientes com elevado nível de ruído. Esses resultados valida sua aplicação em redes sísmicas de cobertura limitada e reforça a segurança operacional de barragens.

Sob a ótica da conformidade regulatória nacional, a arquitetura do sistema apresenta potencial de aplicação no contexto regulatório brasileiro. A exportação automatizada

do catálogo sismológico em formato estruturado CSV facilita o preenchimento periódico do Formulário de Informações de Segurança de Barragens (FSB) exigido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Adicionalmente, o mapeamento geoespacial e o cálculo padronizado da magnitude de duração (m_D) estão alinhados aos requisitos de inserção de dados no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), sob governança da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Por fim, ao reduzir a influência do viés interpretativo humano no *picking* das fases, o fluxo contribui para o atendimento das diretrizes de rastreabilidade técnica e auditoria preconizadas pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB - Lei nº 12.334/2010), uma vez que cada detecção pode ser rastreada com parâmetros claros.

A implementação de métodos automatizados baseados em bibliotecas validadas, como o *SeisBench*, permite o processamento contínuo de fluxos de dados e o cálculo quase instantâneo de localização e magnitude. Isso proporciona um sistema de alerta precoce mais ágil, essencial para a gestão de riscos.

Ao automatizar a triagem inicial e o *picking* das fases sísmicas, o código otimiza processos ao fornecer um mapa global acumulado para a visualização de todos os eventos de uma campanha. Além disso, a integração com o *Snuffler*, por meio de marcadores e *scripts shell* automatizados, permite a inspeção visual das janelas contendo os *picks* das fases. Dessa forma, a equipe de especialistas pode concentrar-se na validação de eventos críticos e na interpretação estratégica dos resultados, reduzindo a demanda por tarefas técnicas repetitivas.

Por fim, apesar da limitada disponibilidade de conjunto de dados de sismicidade local, provenientes de UHEs e atividades de mineração no Brasil, o desempenho do modelo pré-treinado é promissor. O algoritmo apresenta elevado potencial de aprimoramento via *fine-tuning* ou *retraining* com dados proprietários (ex.: AXIA Energia), visando otimizar a segurança estrutural de barragens a longo prazo.

4. PALAVRAS-CHAVE

Segurança de barragens; Monitoramento sismológico; Aprendizado de máquina; Aprendizado profundo; Perigo sísmico; Ameaça sísmica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GUTENBERG, B. and RICHTER, C. F. (1954) – “Seismicity of the Earth and Associated Phenomena”, Princeton University Press. Vol. 1, Nº 1, pp. 1-310, Sismicidade Global e Tectônica, Estados Unidos.

[2] SCHOLZ, C. H. (2002) – “The Mechanics of Earthquakes and Faulting”, Cambridge University Press, Mecânica de Rochas, 2ª ed., Reino Unido.

[3] ICOLD (International Commission on Large Dams). (2010) – “Bulletin on Reservoir Induced Seismicity and Dam Safety”, ICOLD, Segurança de Barragens, Paris, França.

[4] WITHERS, M.; ASTER, R.; YOUNG, C.; BEIRIGER, J.; HARRIS, M.; MOORE, S.; TRUJILLO, J. (1998) – “A Comparison of Select Trigger Algorithms for Automated Global Seismic Phase and Event Detection”, Bulletin of the Seismological Society of America, Estados Unidos.

[5] TRNKOCZY, A. (1999) – “Understanding and Parameter Setting of STA/LTA Trigger Algorithm”, Information Sheet IS 8.1, NMSOP-2, Alemanha.

[6] OWENS, T. J. (1988) – “Routine to apply the RefTek trigger algorithm to a designated SAC file”, Seismic Analysis Code (SAC) Software Collection, Sismologia Computacional, vol. 1, Columbia, SC: University of South Carolina.

[7] JURKEVICS, A. (1988) – “Polarization analysis of three-component array data”, Bulletin of the Seismological Society of America, Sismologia e Análise de Sinais, vol. 78, n. 5, Estados Unidos.

[8] ROBERTS, R. G.; CHRISTOFFERSSON, A.; CASSIDY, F. (1989) – “Real-time event detection, phase identification and source location estimation using single station three-component seismic data”, *Geophysical Journal International*, Processamento de Sinais Sísmicos, vol. 97, n. 3, pp. 471–480, Reino Unido.

[9] WOOLLAM, J.; MÜNCHMEYER, J.; TILMANN, F.; RIETBROCK, A.; LANGE, D.; BORNSTEIN, T.; DIEHL, T.; GIUCHI, C.; HASLINGER, F.; JOZINOVIĆ, D.; MICHELINI, A.; SAUL, J.; SOTO, H. (2022) – “SeisBench – A Toolbox for Machine Learning in Seismology”, Seismological Research Letters, Aprendizado de Máquina em Sismologia, Estados Unidos.

[10] ZHU, W. & BEROZA, G. C. (2019) – “PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method”, Geophysical Journal International, Sismologia e Aprendizado de Máquina, vol. 216, ed. 1, Reino Unido.

[11] MOUSAVI, S. M., ELLSWORTH, W. L., ZHU, W., CHUANG, L. Y. & BEROZA, G. C. (2020) – “Earthquake transformer – an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking”, Nature Communications, Sismologia e Inteligência Artificial, vol. 11, n. 3952, Estados Unidos.

[12] ASSUMPÇÃO, M. et al. (2013) – “Models of crustal thickness in South America from seismic refraction, receiver functions and Rayleigh wave tomography”, Tectonophysics, Estrutura Crustal, vol. 609, n. 1-4, Holanda.

[13] KENNETT, B. L. N. & ENGDAHL, E. R. (1991) – “Traveltimes for global earthquake location and phase identification”, Geophysical Journal International, Modelos de Velocidade, vol. 105, n. 2, Reino Unido.

[14] HAVSKOV, J.; OTTEMÖLLER, L. (2001) – “SEISAN: The Earthquake Analysis Software, version 7.2”, Bergen University, Análise de Dados Sísmicos, Noruega.

[15] VAN ROSSUM, G.; DRAKE, F. L. (2009) – “Python 3 Reference Manual”, *Python Software Foundation*, Linguagem de Programação, Estados Unidos.

[16] HARRIS, C. R.; MILLMAN, K. J.; VAN DER WALT, S. J.; et al. (2020) – “Array programming with NumPy”, *Nature*, Computação Científica, vol. 585, Reino Unido.
[17] VIRTANEN, P.; GOMMERS, R.; OLIPHANT, T. E.; et al. (2020) – “SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python”, *Nature Methods*, Computação Científica, vol. 17, Estados Unidos.
[18] BEYREUTHER, M.; BISCHOFF, M.; KRISCH, M.; et al. (2010) – “ObsPy: A Python toolbox for seismology”, *Seismological Research Letters*, Sismologia Computacional, vol. 81, Estados Unidos.
[19] MCKINNEY, W.; TEAM, T. P. D. (2023) – “Pandas – Powerful data structures for data analysis, time series, and statistics”, Software Library for Python, Análise de Dados e Estatística, Estados Unidos.
[20] HEIMANN, S.; KRIEGERSHOFF, M.; ISKEN, M.; CESCA, S.; DAHM, T. (2017) – “Pyrocko – An open-source seismology toolbox and library: Módulos Cake (Travel-time engine) e Snuffler (Interactive seismogram browser)”. GFZ Data Services. doi.org/10.5880/GFZ.2.1.2017.001, Alemanha.
[21] PYTHON VISUALIZATION PROJECT (2025) – “Folium: Python Data, Leaflet.js Maps”, Disponível em: github.io.
[22] FLINN, E. A. (1965) – “Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion”, Proceedings of the IEEE, Análise de Sinais, vol. 53, n. 12, Estados Unidos.
[23] GEOONDAS (2020) – “Acompanhamento da Sismicidade de Interesse do Programa de Monitoramento Sismológico da UHE de Serra da Mesa (GO)”, Relatório Semestral nº 02 –Janeiro-Junho de 2018 – Sismologia e Análise de Sinais, São Paulo, Brasil.
[24] LIU, Hsi-Ho. (1985) – “A rule-based system for automatic seismic discrimination”, Pattern Recognition. Vol. 18, Nº 6, pp. 459-463, Reconhecimento de Padrões e Sismologia, Estados Unidos.
[25] WANG, T.; BIAN, Y.; ZHANG, Y.; HOU, X. (2023) – “Classification of earthquakes, explosions and mining-induced earthquakes based on XGBoost algorithm”, Computers & Geosciences, Inteligência Artificial na Sismologia, vol. 170, n. 105242, Reino Unido.



Walter CÁRDENAS
Físico pela Universidade Federico Villarreal (Lima-Peru), com mestrado e doutorado pela Universidade de São Paulo (USP). Realizou pós-doutorado no IME-USP e no Centro Atômico Constituyentes (Argentina). Possui sólida experiência em Física de Reações Nucleares e modelagem numérica aplicada à engenharia e medicina. Foi pesquisador responsável pelo projeto PIPE/

	FAPESP (nº 17/22876-6). Atua no desenvolvimento de métodos computacionais utilizando C/C++, Fortran e Python, com ênfases em algoritmos de Machine Learning e computação de alto desempenho.
	**Edgar RONDAN** Formado em Física pela UNSA (Peru), CEO e cofundador da GEOONDAS Geofísica e Sensoriamento Remoto Ltda. Possui doutorado e mestrado em Física pela Universidade de São Paulo. Experiência em física de plasmas, modelagem computacional e computação de alto desempenho, com atuação no CBPF e no CERN. Especialista em instrumentação geofísica, métodos sísmicos, simulação e aprendizado de máquina para dados geofísicos.
	**Cristóbal CONDORI** Geofísico formado pela Universidade Nacional de San Agustín (UNSA), Peru, com mestrado e doutorado em Geociências Aplicadas pela Universidade de Brasília. Professor e pesquisador da UNSA, diretor do IDIGUNSA e ex-analista de sismologia do IGP. Sua atuação concentra-se na estrutura da crosta e do manto superior utilizando métodos sismológicos, com experiência em sismicidade induzida, risco sísmico, inversão e tomografia.
	**Ricardo VILHENA** Engenheiro Geólogo, Mestre em Geotecnia (Universidade Federal de Goiás), Especialista em Segurança de Barragens (UFBA). Mais de 20 anos de experiência profissional no setor de energia, em entidades públicas e privadas. Ampla experiência em estudos geológicos e geotécnicos para barragens hidrelétricas, incluindo mapeamento, perfuração, geofísica, ensaios de laboratório (solo/rocha) e modelagem geológica. Atualmente ocupa um cargo na divisão de gestão de Segurança de Barragens da AXIA Energia Sudeste.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.4
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DA TERMOGRAFIA EMBARCADA EM RPA EM CAMPANHAS DE INSPEÇÃO DE UMA BARRAGEM DE TERRA VISANDO A DETECÇÃO DE SURGÊNCIAS CONTROLADAS

Murilo LIMA
Mestre em Segurança de Barragens e Gestão Ambiental – Universidade Federal do Pará

Eudes BARROS
Mestre em Segurança de Barragens e Gestão Ambiental – Universidade Federal do Pará

Fernanda GOUVEIA
Doutora em Engenharia - Universidade Federal do Pará

RESUMO

A atividade de inspeção é parte fundamental da rotina de gestão de segurança de barragens visando a detecção ou o controle de anomalias, tais como surgências. Buscando aplicar novas tecnologias em inspeções, a pesquisa propõe o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) com câmeras térmicas, como ferramenta auxiliar na detecção de locais com surgências controladas, utilizando como área de estudo uma barragem de terra para fins de mineração, localizada no estado do Pará, Brasil. As câmeras termográficas utilizam sensores térmicos para captar a radiação verificada nas superfícies de interesse, sendo convertida em imagens que traduzem a energia térmica em uma distribuição visível de temperatura superficial. Logo, dois estudos foram aplicados ao barramento de interesse, sendo na primeira realizados voos com o RPA, em altura fixa, analisando a correlação entre temperatura, umidade e a presença de surgências nos períodos chuvoso e não chuvoso. A segunda pesquisa variou parâmetros de altura de voo e incidência solar analisando as imagens termográficas obtidas nessas novas condições. Conclui-se que a técnica não foi eficaz para a identificação das áreas com umidade no talude, visto que as imagens apresentaram variabilidade de paleta de cores para uma mesma região, à medida que se variaram altitude e incidência solar, não apresentando um padrão de resposta. No entanto, a técnica demonstrou ser aderente em superfícies com presença de fluxo constante de água, tal como as áreas dos extravasores, visto que as imagens termográficas mantiveram cores frias nesses locais.

.

ABSTRACT

Inspection is a fundamental part of the routine for dam managers, aiming at the early detection of instabilities, monitoring of deformations, and ensuring structural integrity, as required by Brazilian regulations since 2010. In this context, the application of new technologies, such as Remotely Piloted Aircraft (RPA), has expanded to visual inspections that, when used together with thermal cameras equipped to generate thermographic maps opens opportunities to analyze the effectiveness of this technique in identifying areas with seepage. Although thermography is already used in concrete dams and building facades, there is a gap in studies applied to earth dams with controlled seepage. This article presents the results of two studies conducted on the downstream slope of a homogeneous earth dam for mining purposes, located in Pará. The first study consisted of fixed-altitude thermographic flights in two distinct climatic periods, analyzing the correlation between temperature, humidity, and the presence of seepage. The second study varied flight altitude and solar incidence parameters to identify optimized scenarios for image capture. It concluded that, under the tested conditions, the aerial thermography technique did not allow for the confirmation of areas with controlled seepage, highlighting the need for methodological refinement for the application of this technology in monitoring earth dams.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de barragens fundamenta-se, primordialmente, na execução de inspeções visuais detalhadas e na análise técnica de dados provenientes de instrumentação geotécnica. Esta atividade não se limita apenas à detecção de alertas precoces para colapsos estruturais, ela fornece subsídios fundamentais para validar os parâmetros de projeto, investigar os gatilhos causadores de deformações e consolidar lições aprendidas que serão aplicadas em futuras estruturas [1].

Nas últimas décadas, a gestão de segurança de barragens foi significativamente potencializada pelo advento de técnicas de sensoriamento remoto, operadas a partir de plataformas terrestres e orbitais. Estas tecnologias abriram oportunidades inéditas para a análise estrutural, uma vez que permitiram estender o monitoramento para a totalidade das estruturas de um barramento, superando a visão limitada dos tradicionais pontos de controle isolados [1][2].

Diante da complexidade intrínseca aos eventos da mineração e acompanhando o ritmo dos avanços tecnológicos, o setor tem adotado métodos inovadores de inspeção, com destaque para o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), conhecidas popularmente como drones. Especialistas validam o uso de RPAs como uma ferramenta de alta performance para inspeções de campo em obras de infraestrutura, permitindo a execução de aerofotogrametria e a geração de modelos tridimensionais precisos para a detecção de fissuras, erosões e outras anomalias [2][3].

Uma das aplicações mais promissoras dos RPAs é a integração de câmeras termográficas que utilizam os princípios da radiação infravermelha para a geração de termogramas. Essas imagens térmicas mapeiam a distribuição de temperatura na superfície dos objetos, consolidando-se como um ensaio não destrutivo eficaz para a captação remota de gradientes de calor [4][5][6].

No contexto específico da mineração, a inspeção convencional é um procedimento de segurança vital para avaliar as condições físicas das estruturas, e a falta de inspeções adequadas pode acarretar impactos significativos na infraestrutura e em vidas humanas. A termografia atua como um braço tecnológico que complementa a inspeção visual tradicional [7][8].

A eficácia da inspeção por termografia foi avaliada por [9] em quatro barragens em escala real. O estudo identificou que áreas com alto teor de umidade no solo apresentam temperaturas inferiores, indicando que elas podem ser propensas à erosão interna e infiltração progressiva. Paralelamente, [10] aplicaram a técnica em um modelo físico de barragem sob condições de saturação, concluindo que a detecção em solos é eficiente e sugerindo otimizações para a sua aplicação.

Contudo, apesar desses progressos, nota-se uma escassez de pesquisas que avaliem sistematicamente como variáveis operacionais e condições ambientais influenciam a precisão da detecção de surgências via termografia aérea. Diante dessa lacuna metodológica, o presente artigo tem como objetivo apresentar dois estudos aplicados de termografia com uso de RPA em uma barragem de mineração, focando na eficácia da detecção e no monitoramento de surgências controladas sob diferentes cenários de inspeção.

2. INSPEÇÕES TERMOGRÁFICAS COM RPA

2.1 Monitoramento de barragens e surgências

A segurança de barragens é intrinsecamente dependente da identificação precoce de manifestações patológicas que possam comprometer a estabilidade, a operação ou o estado de conservação da estrutura [8]. Tradicionalmente, o monitoramento fundamenta-se em instrumentação geotécnica de contato. Piezômetros são utilizados para a avaliação de subpressões e do padrão de infiltração em maciços [11][12], enquanto marcos superficiais e inclinômetros permitem medir deslocamentos horizontais, verticais e a estabilidade de taludes [13][14].

Para superar as limitações das análises pontuais, novas abordagens baseadas em sensoriamento remoto ganharam destaque. Tecnologias como o LIDAR (*Light Detection and Ranging*) possibilitam a obtenção de modelos tridimensionais de alta precisão via pulsos laser, facilitando a detecção de deslocamentos ou fissuras superficiais [15][16]. Paralelamente, o monitoramento via satélite, através da Interferometria de Radar de Abertura Sintética (InSAR), viabiliza a medição de deslocamentos em grandes áreas e a identificação de fenômenos geológicos, embora apresente uma complexidade de processamento distinta [17].

Nesse cenário, os Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) consolidam-se como ferramentas intermediárias ideais, equilibrando a gestão da segurança com a contenção de custos de manutenção [2][18]. Diferentemente dos métodos tradicionais de inspeção demorada ou dos satélites com limitações de órbita, os RPAs oferecem alta resolução espacial e repetibilidade de voo [19]. Segundo [20] o uso de RPAs é particularmente vantajoso em zonas de acessibilidade reduzida, permitindo que a inspeção visual direta seja complementada por dados aéreos precisos para monitorar danos estruturais e ambientais de forma segura.

A termografia infravermelha apresenta-se como uma ferramenta de inspeção inovadora, que se baseia no princípio físico da emissão de radiação infravermelha por todos os objetos proporcional à temperatura e à emissividade do material que pode ser aplicado a detecção de surgência [21].

A evolução contínua de uma surgência pode desencadear o *piping* em barragens de terra e rocha. Este processo consiste na remoção progressiva de partículas finas do interior da estrutura pela força da água, gerando danos que podem comprometer a estabilidade global [22].

A detecção por infravermelho parte do ponto, que segundo [23], o mecanismo de formação do *piping* é impulsionado pelo incremento da carga hidráulica externa, que eleva a pressão na base da camada de vedação. Ao atingir o ponto de ruptura, a pressão hidrostática supera a resistência do material, convertendo-se em pressão dinâmica e estabelecendo um caminho preferencial de percolação que culmina na falha da estrutura.

2.2 Princípios da termografia infravermelha em inspeções.

A termografia infravermelha configura-se como um ensaio não destrutivo que utiliza sensores térmicos para captar essa radiação e convertê-la em termogramas, imagens que traduzem a energia térmica em uma distribuição visível de temperatura superficial, imperceptível ao olho humano [24].

A aplicação da técnica classifica-se conforme a natureza do estímulo térmico:

- Termografia Passiva: Ocorre quando a radiação é detectada sob condições ambientais naturais, sem estímulo artificial [26].
- Termografia Ativa: Envolve a aplicação de um aquecimento induzido. A análise foca na evolução temporal das temperaturas para identificar defeitos internos [27][28].

A eficácia do diagnóstico depende da relação entre radiação e temperatura, regida por leis físicas como as de Planck, Stefan-Boltzmann e Wien [29]. Dois fatores são determinantes para a precisão dos dados: a temperatura do objeto (maior calor resulta em maior radiação) e a emissividade, que representa a eficiência de um material em irradiar energia térmica em comparação a um corpo negro ideal [30].

No monitoramento de barramentos, a termografia identifica áreas de infiltração hídrica, uma vez que a água percolada apresenta, geralmente, uma assinatura térmica distinta da estrutura sólida (terra ou concreto). Esse diferencial cria anomalias térmicas visíveis que sinalizam rachaduras, falhas de impermeabilização ou deficiências no sistema de drenagem [31][14][10].

A câmera termográfica é um dispositivo projetado para detectar energia infravermelha (calor), convertendo-a em sinais elétricos para a geração de imagens e execução de cálculos de temperatura. Estruturalmente, esses aparelhos são compostos por arranjos ópticos, elementos detectores, conhecidos como *Focal Plane Arrays* (FPAs) ou microbolômetros, sistemas de arrefecimento e componentes eletrônicos associados [21][24]

A eficácia da técnica em campo é influenciada por parâmetros que podem induzir erros [25]. A acurácia está ligada à distância entre o sensor e o objeto, bem como ao tamanho do ponto de medição (spot size), que representa a área real coberta por um pixel na imagem capturada [25].

Os fatores que afetam a qualidade das imagens dividem-se em três esferas principais:
A. Parâmetros do Objeto

- Emissividade (ε): Capacidade de um material emitir radiação em comparação a um corpo negro perfeito [24][30]. Materiais de alta emissividade aparenta ser mais "quentes", sendo que superfícies rugosas tendem a apresentar maior emissividade que as lisas [5][30]. Define-se como a eficiência com que um objeto irradia energia térmica [26].
- Configuração Interna: Presença de vazios internos que criam padrões de temperatura distintos na superfície [5].
- Condição Superficial: Presença de sujidade ou resíduos (óleo, borracha) que alteram a emissividade local e a medição [30].

B. Parâmetros Ambientais

- Radiação Solar: Energia eletromagnética que aquece a superfície e interfere diretamente no contraste térmico entre regiões [5].

- Nebulosidade e Atmosfera: Nuvens refletem radiação infravermelha, afetando as medições noturnas. Além disso, a temperatura do ar e a umidade relativa entre a câmera e o objeto devem ser configuradas para garantir precisão [24].
- Temperatura Refletida e Distância: A energia térmica média do ambiente refletida pelo alvo e a distância operacional afetam a intensidade da radiação que atinge o sensor [24].

C. Parâmetros da Câmera

- Resolução e Precisão: Determinam o nível de detalhamento para identificar variações sutis [21][32] e a capacidade de medir a temperatura com exatidão [24][30].
- Sensibilidade Térmica (NETD): Menor diferença de temperatura mensurável pelo sensor [21]. Câmeras modernas podem ter NETD inferior a 0,025 K [21]. Modelos como a FLIR E-60 possuem sensibilidade de <0,05 ºC, enquanto a Testo-869 apresenta <120 mK [24][33].

Outro ponto importante referente a captura de imagens térmicas é o *Ground Sampling Distance* (GSD), que indica o tamanho real do objeto no solo representado por um pixel. Para a detecção eficaz de anomalias em barragens de terra, o GSD não deve ser superior a 2 cm, o que frequentemente restringe a distância de medição a cerca de 6 metros para sensores convencionais [10].

3. METODOS DE PESQUISA

A metodologia proposta para este trabalho adota uma abordagem qualitativa para avaliar a aplicabilidade da termografia infravermelha embarcada em Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) no monitoramento de barragens de terra, através da apresentação e análise das pesquisas conduzidas por [34] e [35]. O desenho metodológico foi estruturado para demonstrar como os ensaios foram realizados, testando seus limites em cenários práticos reais. Ao confrontar o imageamento aéreo com ensaios físicos de caracterização do solo e variações de parâmetros ambientais, buscou-se avaliar a eficácia real do método para a identificação de surgências em áreas controladas.

As etapas metodológicas macro foram organizadas de forma linear e complementar, sendo divididas em três estágios principais: (i) Caracterização da estrutura geotécnica e histórico de monitoramento; (ii) Aquisição de dados termográficos e ensaios físicos de campo; e (iii) Processamento digital e protocolo de integração comparativa de eficácia técnica, conforme figura 1.

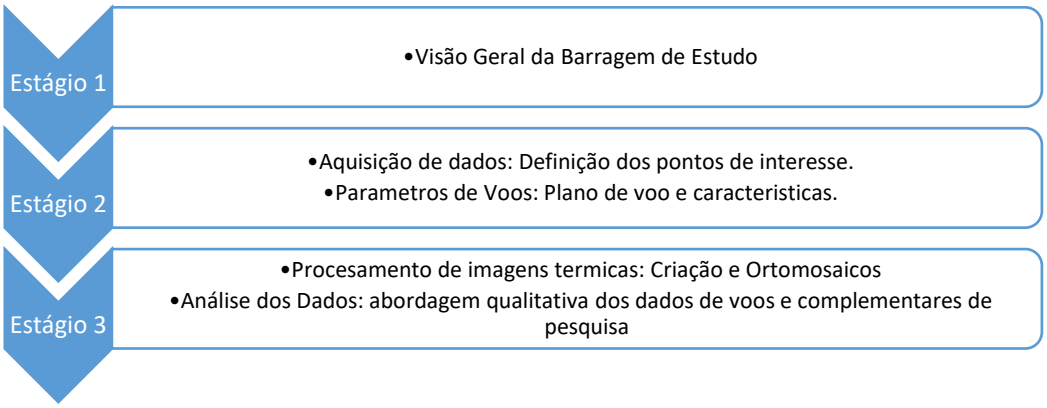


Figura 1 – Etapas metodológicas

3.1 Visão Geral da Barragem de Estudo

A estrutura em análise, localizada no município de Parauapebas (PA), constitui um ativo geotécnico construído em 1986. Com a função primordial de contenção de finos e sedimentos, além da regularização de vazões para captação hídrica, a barragem encontra-se devidamente cadastrada no Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM) da ANM. Sob a ótica regulatória, é classificada com Categoria de Risco (CRI) Baixa e Dano Potencial Associado (DPA) Médio, balizando as diretrizes de segurança e monitoramento aplicadas.

Do ponto de vista construtivo, trata-se de um barramento de terra homogênea com dimensões de 140 m de comprimento e crista na elevação 501,16 m. A complexidade geológica da fundação é um fator determinante para o comportamento mecânico da estrutura, estando apoiada sobre uma transição de canga química, maciço rochoso de jaspilito e solos residuais de metamáfica.

A integridade estrutural é verificada por um robusto protocolo de monitoramento e inspeção. Complementarmente, a auscultação é realizada por um parque instrumental com 27 piezômetros, medidores de vazão (Calhas Parshall e triangular) e marcos geodésicos. A integração desses dados aos sistemas VDV (Sistema de Visualização de dados) e SHMS (Sistema de Monitoramento da Saúde de Taludes e Estruturas Geotécnicas), permite que o Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG) realize análises em tempo real, mitigando incertezas operacionais.

O histórico da estrutura há presença de surgências na ombreira esquerda detectadas desde 2002. Localizadas entre o maciço e o extravasor, tais anomalias têm sido objeto de monitoramento contínuo e obras de adequação.

3.2 Aquisição de Dados e Análises

A aquisição de dados proposta por [34], considerou um padrão de voos fixos realização das inspeções termográficas com RPA nas estruturas, conforme detalhado na tabela 1.

Para as inspeções foram selecionadas quatro regiões estratégicas da barragem denominadas de R1, R2, R3 e R4, sendo estes locais caracterizados por presença de surgências controladas, conforme registro do Relatório “As Is”. Para cada região foram realizados quatro furos para coleta de amostras de solo, visando a realização de ensaios de caracterização do material. A seguir tem se o detalhamento das regiões inspecionadas:

a) R1- Área de contato do aterro com a ombreira direita;

b) R2- Região imediatamente acima das saídas da drenagem interna;

c) R3 - Região do pé de talude à jusante;

d) R4 - Aterro em contato com o sistema extravasor.

Tabela 1 – Configurações definidas para o sobrevoo.

Altitude	80 m
Velocidade de voo	1,8 m/s
Ângulo de Inclinação das linhas de voo	52°
Sobreposição lateral	80%
Sobreposição frontal	80%
Duração do voo	13min
Área analisada	Área da crista e talude de montante

A rota do sobrevoo compreendeu a área total da barragem, em um tempo médio de 13 minutos, sendo realizada a captura das imagens termográficas, que posteriormente foram armazenadas no cartão de memória do equipamento, organizados por data e hora, e posteriormente transferidos para o computador. A Figura 2 contém as quatro regiões inspecionadas e o percurso da rota de sobrevoo definido na pesquisa.



Figura 2 - Regiões inspecionadas e o percurso da rota de sobrevoo.

Para a campanha de voo, foram definidas as inspeções das quatro regiões realizadas no período de agosto de 2023 a fevereiro de 2024, com o objetivo de obter avaliações em dois períodos climáticos (seco e chuvoso), totalizando oito Campanhas de investigação, conforme Figura 3. As coordenadas dos trinta e dois pontos eram registradas por meio de um aparelho GPS (*Global Positioning System*), marca GRAMIN, modelo GPSMAP 64x. Posteriormente, um trabalho de tratamento das imagens foi realizado para a geração do modelo digital do terreno, contendo a imagem termográfica do barramento, com destaque das quatro regiões de interesse.

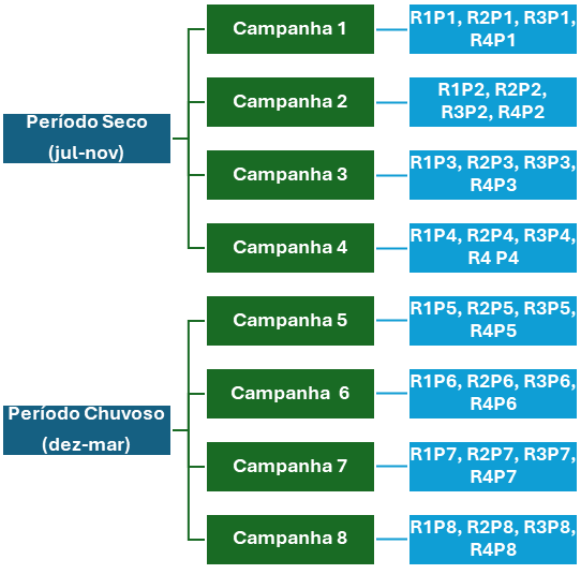


Figura 3 – Planejamento das inspeções.

Após a realização dos sobrevoos foram coletadas de cada região, e para cada ponto de inspeção uma amostra de solo (2kg) a uma profundidade de 20 cm para a realização dos ensaios de caracterização do solo e a sua classificação. Os ensaios realizados comtemplaram: a) análise granulométrica por peneiramento e sedimentação (ABNT NBR 7181) em granulômetro a laser CILAS modelo 1064 LD; b) limites de plasticidade e índice de plasticidade (ABNT NBR 7180); c) limites de liquidez do solo (ABNT NBR 6459), teor de umidade do solo (ABNT NBR 6457).

A segunda pesquisa observou quatro pontos na face do talude de jusante com regiões sem histórico de surgência e regiões com registros de surgências controladas, conforme indicado na Figura 4. A escolha desses pontos visou permitir uma análise comparativa das imagens termográficas de áreas sem registros de surgências (P1 e P2) e com surgências controladas (P3 e P4).



Figura 4 – Visão da Barragem de estudo com os pontos de interesse.

O delineamento da campanha de voo para aquisição dos termogramas foi planejado para 12 cenários, sendo obtidos ao final, 11 cenários devido aos arquivos de um dos cenários ter sido corrompidos, impossibilitando assim, a obtenção da imagem

termográfica resultante daquela inspeção. Os voos foram executados entre os meses de maio a novembro de 2025, o que caracteriza o período seco na região, cuja ocorrência de chuvas é reduzida, sendo um período satisfatório para a avaliação da influência da incidência solar na termografia.

Visando avaliar a variação da resolução das imagens capturadas, que é dada pelo GSD, quatro altitudes de voo foram experimentadas: 100 m, 80 m, 60 m e 30 m, realizados nos turnos matutino e vespertino. Vale destacar que a altura máxima recomendada pela ANAC, definido no RBAC-E nº94 de 03 de abril de 2023, para voos é de 120 m, sendo definido assim, 100 m a altura máxima para fins da pesquisa, visando a não estrapolação dos 120 m. E no caso dos 30 m como limite mínimo, a escolha foi baseada na Análise de Risco Operacional (ARO) que considerou a presença de árvores e outros obstáculos existentes na vizinhança da barragem. As características de cada voo estão dispostas na tabela 2

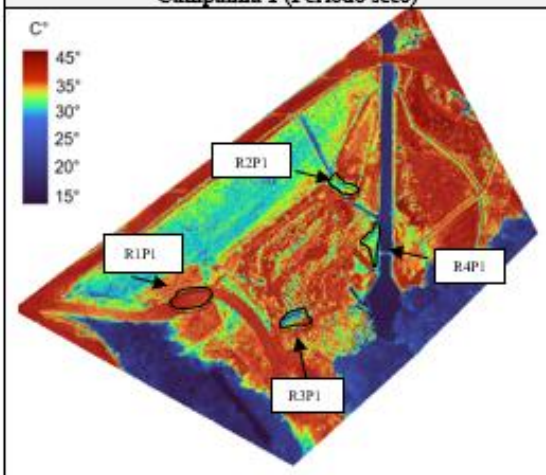
Tabela 2 – Cenários definidos para captura de dados

Cenário	Altura de voo	Condição atmosférica	Incidência Solar
1	100	Tarde ensolarada	Alta
2		Tarde nublada	Baixa
3		Manhã ensolarada	Baixa
4	80	Tarde ensolarada	Alta
5		Tarde nublada	Baixa
6		Manhã ensolarada	Baixa
7	60	Tarde ensolarada	Alta
8		Tarde nublada	Baixa
9		Manhã	Baixa
10	30	Tarde ensolarada	Alta
11		Tarde nublada	Baixa
12		Manhã ensolarada	Baixa

4. RESULTADOS

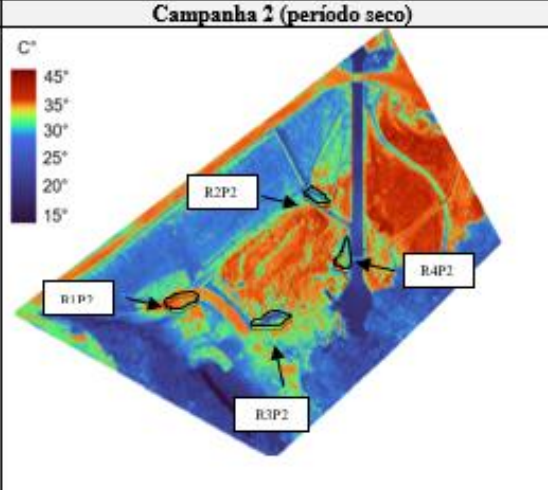
As Figuras 5 e 6 contêm os mapeamentos termográficos resultantes da inspeção para os períodos seco e chuvoso da pesquisa conduzida por [34]. Na primeira pesquisa apresentada neste artigo, foi analisada a relação entre a temperatura superficial do solo e o seu teor de umidade, como parte da avaliação da aplicabilidade da termografia embarcada em RPA para a detecção de surgências controladas. Através da coleta de amostras in situ a 20 cm de profundidade, realizadas concomitantemente aos sobrevoos, foi observado que as áreas identificadas com as menores temperaturas nos ortomosaicos térmicos correspondiam, invariavelmente, aos maiores percentuais de umidade.

Campanha 1 (Período seco)



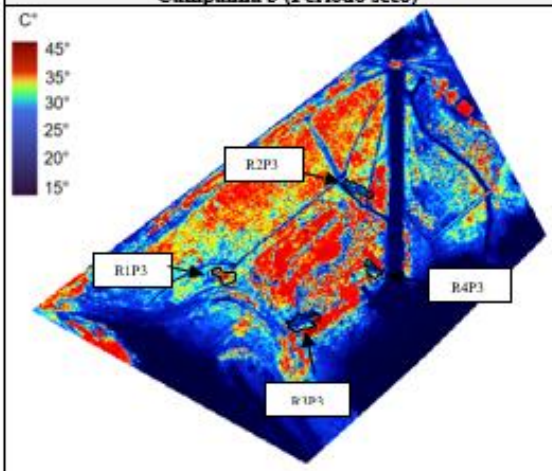
Propriedades Físicas	Pontos de coleta			
	R3P1	R2P1	R4P1	R1P1
Temperatura do solo capturada pelo TERMO-RPA (°C)	29°	30°	32°	44°
Umidade do solo (%)	60%	38%	18%	1%
UR do ar (%)	71%			
Temperatura ambiente (°C)	32°			
Classificação do solo, conforme TRB	A-2-4(0)	A-2-4(0)	A-1-b(0)	A-7-5(5)

Campanha 2 (período seco)



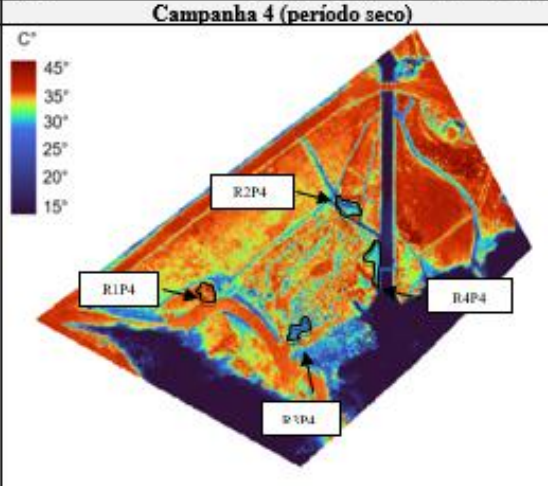
Propriedades Físicas	Pontos de coleta			
	R3P2	R2P2	R4P2	R1P2
Temperatura do solo capturada pelo TERMO-RPA (°C)	28°	31°	31°	42°
Umidade do solo (%)	62%	36%	20%	2%
UR do ar (%)	70%			
Temperatura ambiente (°C)	31°			
Classificação do solo, conforme TRB	A-2-4(0)	A-2-4(0)	A-1-b(0)	A-7-5(5)

Campanha 3 (Período seco)



Propriedades Físicas	Pontos de coleta			
	R3P3	R2P3	R4P3	R1P3
Temperatura do solo capturada pelo TERMO-RPA (°C)	27°	29°	30°	41°
Umidade do solo (%)	64%	39%	22%	2%
UR do ar (%)	69%			
Temperatura ambiente (°C)	26°			
Classificação do solo, conforme TRB	A-2-4(0)	A-2-4(0)	A-1-b(0)	A-7-5(5)

Campanha 4 (período seco)

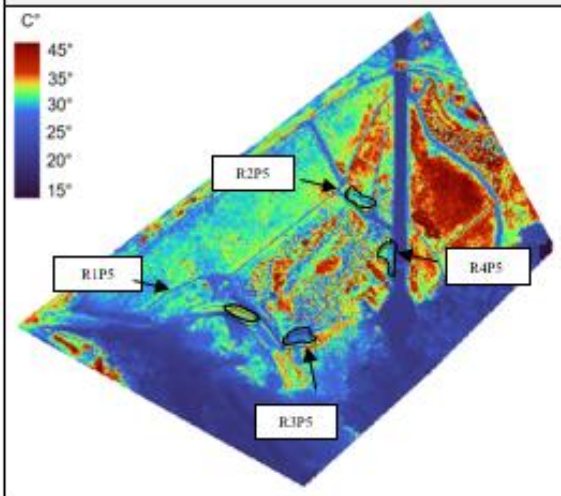


Propriedades Físicas	Pontos de coleta			
	R3P4	R2P4	R4P4	R1P4
Temperatura do solo capturada pelo TERMO-RPA (°C)	28°	31°	30°	44°
Umidade do solo (%)	63%	36%	21%	1%
UR do ar (%)	89%			
Temperatura ambiente (°C)	30°			
Classificação do solo, conforme TRB	A-2-4(0)	A-2-4(0)	A-1-b(0)	A-7-5(5)

Figura 5 – Mapeamento termográfico do período seco.

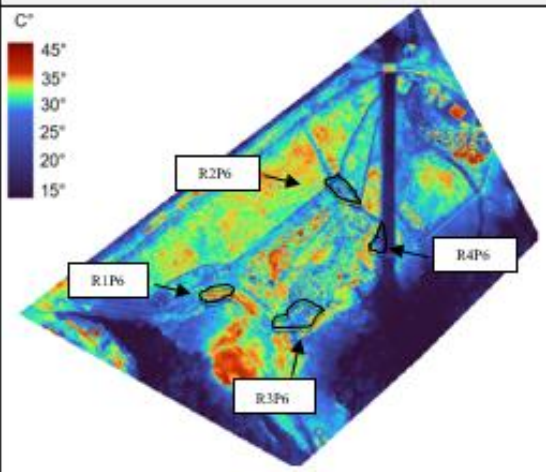
Estatisticamente, essa relação foi validada por coeficientes de determinação (R^2) extremamente elevados, variando entre 0,90 e 0,97. Tais valores indicam que o método possui uma precisão robusta para identificar o gradiente térmico gerado por processos de infiltração, mesmo em condições climáticas distintas (períodos seco e chuvoso). Nas regiões R2, R3 e R4, que possuíam histórico de surgências controladas, o sensor Zenmuse XT2 foi capaz de delimitar com clareza as zonas saturadas, que se manifestaram como "manchas frias" no espectro infravermelho em contraste com a região seca (R1).

Campanha 5 (período chuvoso)



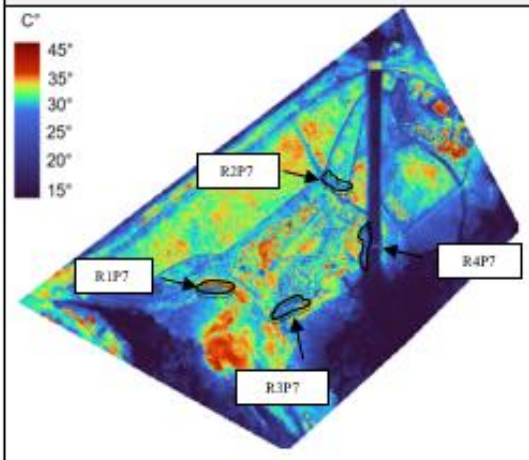
Propriedades	Pontos de Coleta			
	R3P5	R2P5	R4P5	R1P5
Temperatura do solo capturada pelo TERMO-RPA (°C)	27°	30°	31°	35°
Umidade do solo (%)	65%	42%	22%	7%
Umidade relativa do ar (%)	97%			
Temperatura ambiente (°C)	26°			
Classificação do solo, conforme TRB	A-2-4(0)	A-2-4(0)	A-1-b(0)	A-7-5(5)

Campanha 6 (período chuvoso)



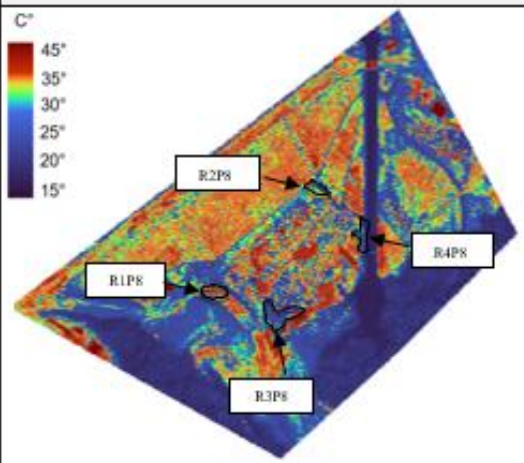
Propriedades	Pontos de Coleta			
	R3P6	R2P6	R4P6	R1P6
Temperatura do solo capturada pelo TERMO-RPA (°C)	29°	28°	30°	36°
Umidade do solo	63%	46%	23%	6%
Umidade relativa do ar (%)	83%			
Temperatura ambiente (°C)	24°			
Classificação do solo, conforme TRB	A-2-4(0)	A-2-4(0)	A-1-b(0)	A-7-5(5)

Campanha 7 (período chuvoso)



Propriedades	Pontos de Coleta			
	R3P7	R2P7	R4P7	R1P7
Temperatura do solo capturada pelo TERMO-RPA (°C)	28°	29°	29°	37°
Umidade do solo (%)	64%	45%	23%	4%
Umidade relativa do ar (%)	95%			
Temperatura ambiente (°C)	26°			
Classificação do solo, conforme TRB	A-2-4(0)	A-2-4(0)	A-1-b(0)	A-7-5(5)

Campanha 8 (período chuvoso)



Propriedades	Pontos de Coleta			
	R3P8	R2P8	R4P8	R1P8
Temperatura do solo capturada pelo TERMO-RPA (°C)	26°	29°	28°	36°
Umidade do solo	67%	44%	24%	5%
Umidade relativa do ar (%)	85%			
Temperatura ambiente (°C)	27°			
Classificação do solo, conforme TRB	A-2-4(0)	A-2-4(0)	A-1-b(0)	A-7-5(5)

Figura 6 – Mapeamento termográfico do período chuvoso.

Um aspecto observado na primeira pesquisa está na correlação do tipo de solo com a eficácia da detecção térmica. Embora os ensaios de granulometria e limites de Atterberg tenham sido realizados, a análise dele se mostrou inconclusiva quanto à influência da textura do solo na resposta do sensor. Isso ocorreu devido à homogeneidade das áreas de surgência estudadas, todas classificadas como areia com pedregulho.

Diante das observações dos dados coletados, pode se demonstrar que, independentemente da classificação TRB do solo, a presença da água é o fator preponderante que altera a inércia térmica da superfície do talude, permitindo que o RPA identifique anomalias que, muitas vezes, passariam despercebidas em uma inspeção visual convencional, especialmente quando a vegetação começa a encobrir os sinais de umidade.

A análise das inspeções destaca que a técnica é particularmente valiosa para os itens de verificação relacionados a "falhas na drenagem" e "pontos de surgência". Uma vez que a maior utilidade prática do método ocorre em cenários de Nível de Emergência 2 e 3 (NE2 e NE3), onde nestas situações, o risco de ruptura é iminente e a presença humana no talude de jusante é proibida por normas de segurança, o monitoramento por RPA equipado com sensores térmicos torna-se o único meio seguro de avaliar a evolução de infiltrações e o potencial agravamento de processos de erosão interna (*piping*) à distância.

Um ponto de destaque é que a termografia embarcada não substitui a instrumentação tradicional (como piezômetros), mas preenche uma lacuna crítica no monitoramento espacial contínuo da face da barragem, oferecendo uma visão holística que a instrumentação pontual não consegue suprir.

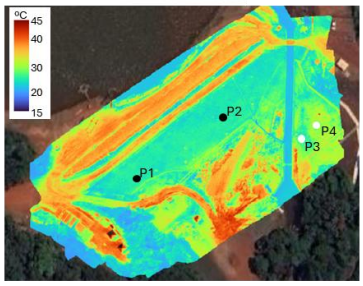
A análise desenvolvida [35] oferece um contraponto técnico essencial ao estudo de [35] ao investigar as condições de contorno que podem invalidar ou mascarar um diagnóstico termográfico em campo. O foco da análise recaiu sobre a sensibilidade do método face à radiação solar e à resolução espacial determinada pela altitude de voo.

As figuras 7, 8, 9, 10 e 11 apresentam os dados de termogramas a partir das inspeções conforme planejamento de voos. A análise das imagens térmicas geradas aponta a radiação solar como a variável ambiental de maior impacto na fiabilidade dos termogramas. Através da comparação entre 11 cenários, observou-se que sob alta radiação (turnos da tarde), ocorre uma saturação térmica da superfície do talude. Esse fenómeno eleva a temperatura da camada superficial de solo de forma tão intensa que o diferencial térmico esperado para a água infiltrada (mancha fria) é "absorvido" pelo aquecimento solar, gerando falsos negativos.

Por outro lado, em condições de baixa radiação (manhã ou céu nublado), a análise revelou que o talude tende a uma uniformidade térmica fria. Nestes casos, a distinção entre solo seco e solo com humidade controlada torna-se discreta demais para os sensores, dificultando a delimitação precisa das áreas de interesse. Esta constatação é fundamental para a gestão de riscos, pois indica que existe uma "janela de oportunidade" muito restrita para a captura de dados fiáveis.

No que concerne às variáveis operacionais, observou-se que o impacto da altitude (variando entre 30 m e 100 m) na qualidade da inspeção. A análise demonstrou que, embora voos a altitudes mais baixas (30 m e 60 m) resultem num GSD superior, ou seja, imagens com maior riqueza de detalhes espaciais, esta melhoria na resolução não se traduziu necessariamente num aumento da detectabilidade de surgências de baixo fluxo.

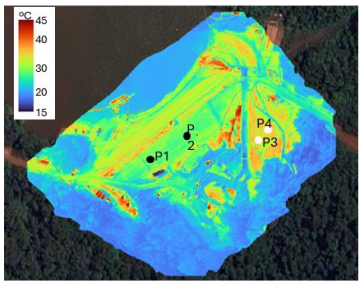
Cenário 1



Data: 06/05/2025 **Horário:** 14:30

Dados ambientais				
Turno/Condição Atmosférica	Tarde Ensolarada			
Radiação solar (W/m²)	276,72			
Umidade relativa do ar (%)	67,1			
Temperatura ambiente (°C)	28,2			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	24,16	24,82	26,11	30,93
Dados do voo				
GSD (cm/pixel)	8,89			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	6 m 43 s			
Quantidade fotos	58			

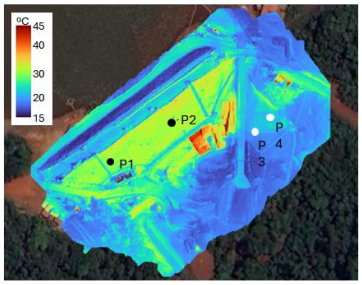
Cenário 2



Data: 25/09/2025 **Horário:** 15:30

Dados ambientais				
Turno/Condição Atmosférica	Tarde Nublada			
Radiação solar (W/m²)	190,40			
Umidade relativa do ar (%)	73,8			
Temperatura ambiente (°C)	26,5			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	28,16	27,94	32,57	33,97
Dados do voo				
GSD (cm/pixel)	8,89			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	7 m 25s			
Quantidade fotos	65			

Cenário 3

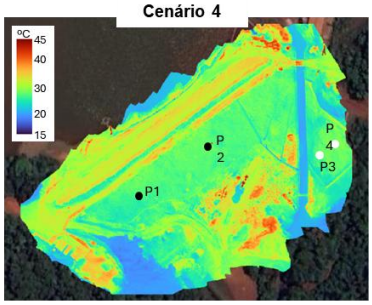


Data: 24/10/2025 **Horário:** 07:45

Dados ambientais				
Turno/Condição Atmosférica	Manhã ensolarada			
Radiação solar (W/m²)	130,77			
Umidade relativa do ar (%)	50,7			
Temperatura ambiente (°C)	26,6			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	30,47	30,74	23,14	22,59
Dados do voo				
GSD (cm/pixel)	8,89			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	6 m 43 s			
Quantidade fotos	58			

Figura 7 – Termogramas obtidos para voos com altura de 100 metros.

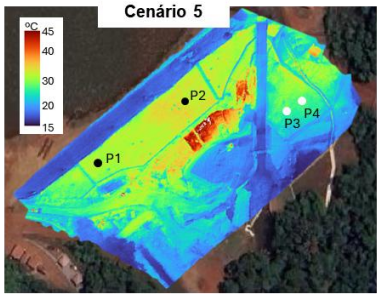
Cenário 4



Data: 09/05/2025 **Horário:** 15:30

Dados ambientais				
Turno/Condição Atmosférica	Tarde Ensolarada			
Radiação solar (W/m²)	179,30			
Umidade relativa do ar (%)	62,07			
Temperatura ambiente (°C)	29,6			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	26,07	25,67	25,94	28,44
Dados do voo				
GSD (cm/pixel)	7,11			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	11 m 58 s			
Quantidade fotos	174			

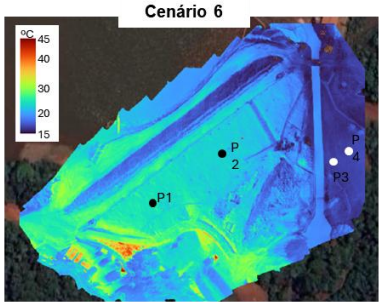
Cenário 5



Data: 31/10/2025 **Horário:** 15:00

Dados ambientais				
Turno/Condição Atmosférica	Tarde Nublada			
Radiação solar (W/m²)	138,45			
Umidade relativa do ar (%)	81,3			
Temperatura ambiente (°C)	23,3			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	30,55	33,09	25,83	28,45
Dados do voo				
GSD (cm/pixel)	7,11			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	9 m 58 s			
Quantidade fotos	107			

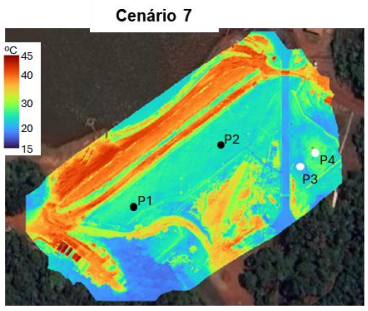
Cenário 6

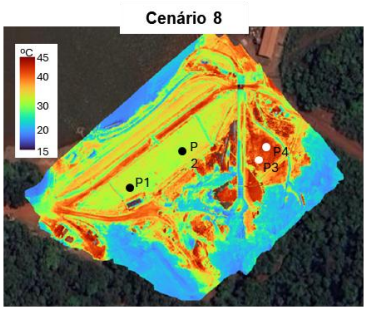


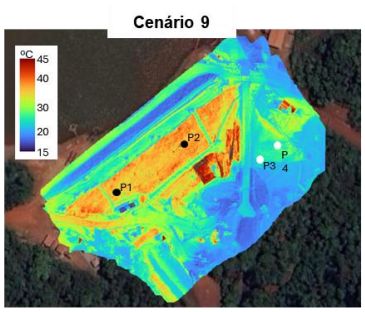
Data: 16/05/2025 **Horário:** 08:00

Dados ambientais				
Turno/Condição Atmosférica	Manhã Ensolarada			
Radiação solar (W/m²)	84,95			
Umidade relativa do ar (%)	62,07			
Temperatura ambiente (°C)	29,6			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	25,44	23,98	16,87	17,23
Dados do voo				
GSD (cm/pixel)	7,11			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	11 m 58 s			
Quantidade fotos	174			

Figura 8 – Termogramas obtidos para voos com altura de 80 metros.







Data: 06/05/2025 **Horário:** 14:45

Dados ambientais				
Turno/Condição Atmosférica	Tarde Ensolarada			
Radiação solar (W/m²)	276,72			
Umidade relativa do ar (%)	67,1			
Temperatura ambiente (°C)	28,2			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	26,14	25,50	23,06	27,82
Dados do voo				
GSD (cm/pixel)	5,33			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	13m 58 s			
Quantidade fotos	188			

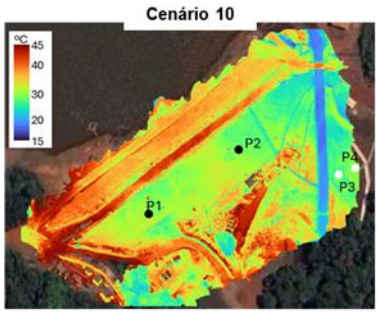
Data: 30/09/2025 **Horário:** 14:30

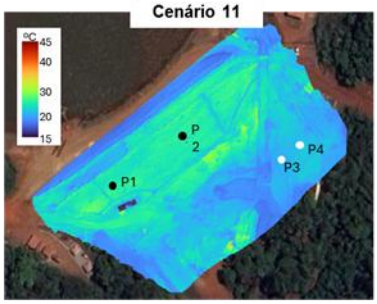
Dados ambientais				
Turno/Condição Atmosférica	Tarde Nublada			
Radiação solar (W/m²)	309,46			
Umidade relativa do ar (%)	52,1			
Temperatura ambiente (°C)	31,1			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	33,41	29,45	38,03	40,26
Dados do voo				
GSD (cm/pixel)	5,33			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	14m 40 s			
Quantidade fotos	207			

Data: 24/10/2025 **Horário:** 08:00

Dados ambientais				
Turno/Condição Atmosférica	Manhã Ensolarada			
Radiação solar (W/m²)	130,77			
Umidade relativa do ar (%)	50,7			
Temperatura ambiente (°C)	26,6			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	34,56	34,48	25,13	28,43
Dados do voo				
GSD (cm/pixel)	5,33			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	13m 58 s			
Quantidade fotos	188			

Figura 9 – Termogramas obtidos para voos com altura de 60 metros.





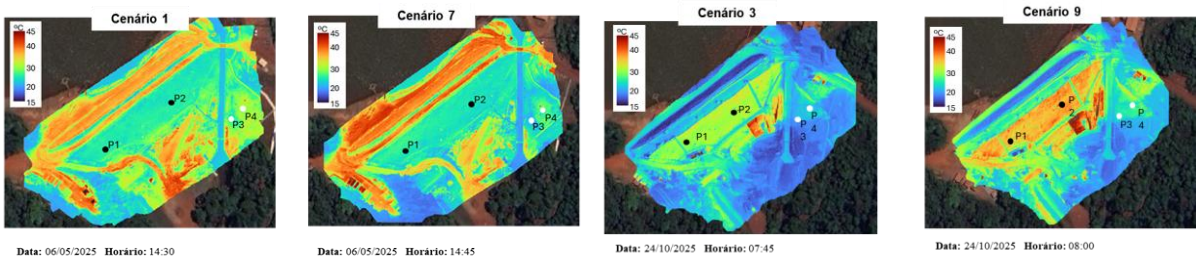
Data: 18/05/2025 **Horário:** 12:15

Dados ambientais				
Turno/Condição Atmosférica	Tarde Ensolarada			
Radiação solar (W/m²)	498,04			
Umidade relativa do ar (%)	56,3			
Temperatura ambiente (°C)	29,9			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	26,14	24,82	26,11	30,93
Dados do voo				
GSD (cm/pixel)	2,67			
Velocidade voo (m/s)	2.5			
Tempo estimado	25m 42s			
Quantidade fotos	735			

Data: 20/10/2025 **Horário:** 08:00

Dados ambientais				
Turno/Condição Atmosférica	Manhã Ensolarada			
Radiação solar (W/m²)	23,37			
Umidade relativa do ar (%)	78,3			
Temperatura ambiente (°C)	24,8			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	26,04	25,37	21,25	22,55
Dados do voo				
GSD (cm/pixel)	2,67			
Velocidade voo (m/s)	2.5			
Tempo estimado	25m 42s			
Quantidade fotos	735			

Figura 10 – Imagens termográficas obtidas para voos com altura de 30 metros.



Data: 06/05/2025 **Horário:** 14:30

Dados ambientais				
Altura do voo (m)	100			
GSD (cm/pixel)	8,89			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	6 m 43 s			
Quantidade fotos	58			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	24,16	24,82	26,11	30,93
Dados do voo				
Radiação solar (W/m²)	276,72			
Umidade relativa do ar (%)	67,1			
Temperatura ambiente (°C)	28,2			

Data: 06/05/2025 **Horário:** 14:45

Dados ambientais				
Altura do voo (m)	60			
GSD (cm/pixel)	5,33			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	13m 58 s			
Quantidade fotos	188			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	26,14	25,50	23,06	27,82
Dados do voo				
Radiação solar (W/m²)	276,72			
Umidade relativa do ar (%)	67,1			
Temperatura ambiente (°C)	28,2			

Data: 24/10/2025 **Horário:** 07:45

Dados ambientais				
Altura do voo (m)	100			
GSD (cm/pixel)	8,89			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	6 m 43 s			
Quantidade fotos	58			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	30,47	30,74	23,14	22,59
Dados do voo				
Radiação solar (W/m²)	130,77			
Umidade relativa do ar (%)	50,7			
Temperatura ambiente (°C)	26,6			

Data: 24/10/2025 **Horário:** 08:00

Dados ambientais				
Altura do voo (m)	60			
GSD (cm/pixel)	5,33			
Velocidade voo (m/s)	2			
Tempo estimado	13m 58 s			
Quantidade fotos	188			
Temperatura registradas termografia				
Temperatura superficial do solo capturada (°C)	P1	P2	P3	P4
	34,56	34,48	25,13	28,43
Dados do voo				
Radiação solar (W/m²)	130,77			
Umidade relativa do ar (%)	50,7			
Temperatura ambiente (°C)	26,6			

Figura 11 – Termogramas no mesmo turno e incidência solar, com altura de voos diferentes a tarde ensolarada e manhã ensolarada.

O padrão térmico observado manteve-se essencialmente o mesmo, independentemente da altura, sugerindo que, para este tipo de anomalia, o limite da técnica não reside na capacidade de "ver" o pixel, mas sim no contraste térmico insuficiente gerado por fluxos hídricos reduzidos. Um ponto crítico da análise foi a observação de que a técnica produziu inconsistências analíticas ao tentar identificar as surgências controladas de baixo fluxo.

Esta disparidade permite observar que a termografia infravermelha embarcada em RPA, no estágio atual da tecnologia, é uma ferramenta de alta fidelidade para a detecção de fluxos hídricos volumosos e constantes, mas possui baixa assertividade para monitorar infiltrações tratadas ou com fluxo capilar, onde o gradiente térmico é facilmente dissipado por fatores externos.

5. CONCLUSÕES

A análise conjunta dos estudos permitiu concluir que a tecnologia apresenta limitações que podem dificultar as interpretações dos profissionais responsáveis pelas inspeções de barragens com surgências controladas. A transição do modelo teórico para a prática operacional revelou que a eficácia da deteção é altamente dependente da influência da homogeneidade superficial e de variáveis externas. A radiação solar consolidou-se como o principal fator de interferência, agindo como uma variável que pode ocultar surgências sob alta insolação ou gerar falsos positivos em condições de baixa radiação. Ademais, a técnica possui sensibilidade limitada para anomalias de baixo fluxo (surgências controladas), sendo muito mais aderente em zonas de fluxo homogêneo e constante, como as áreas dos extravasores.

A análise comparativa com os estudos selecionados demonstrou que, a literatura indica a viabilidade da termografia infravermelha para a identificação de infiltrações em barragens de terra, porém, essa aplicabilidade está condicionada a cenários em

que as anomalias hidráulicas apresentam magnitude suficiente para gerar alteração de temperatura no solo e consequentemente paletas de cores frias.

Por fim, verificou-se que a aplicação da termografia infravermelha embarcada em RPA, nos cenários analisados, não demonstrou potencial para apoiar o processo de inspeção de barragens de terra para a detecção ou acompanhamento de surgências controladas, ou seja, com baixo índice de umidade no solo.

6. PALAVRAS-CHAVE

Termografia Infravermelha, Inspeção de barragens, Aeronave Remotamente Pilotada (RPA), Drone, Surgência

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] SCAIONI, M.; et al. Geodetic and remote-sensing sensors for dam deformation monitoring. Sensors, Basel, v. 18, n. 11, p. 3682, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/s18113682.

[2] BUFFI, G.; MANCIOLA, P.; GRASSI, S.; BARBERINI, M.; GAMBI, A. Survey of the Ridracoli Dam: UAV–basedphotogrammetry and traditional topographictechniques in the inspection of vertical structures. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8:2, 1562-1579, 2017. DOI: 10.1080/19475705.2017.1362039.

[3] SILVA, R. Estudo da termografia por infravermelho: aplicações na engenharia e determinação de parâmetros termofísicos e geométricos de materiais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

[4] CHEN, C.-Y.; LIU, Z.-H. Applications of thermal images for monitoring surficial temperature changes of naked slope. Proceedings of Engineering and Technology Innovation, [s. l.], v. 5, p. 37–40, 2017.

[5] POZZER, S.; DALLA ROSA, F.; PRAVIA, Z. M. C.; REZAZADEH AZAR, E.; MALDAGUE, X. Long-term numerical analysis of subsurface delamination detection in concrete slabs via infrared thermography. Applied Sciences, Basel, v. 11, p. 4323, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/app11104323.

[6] NOUFID, A.; HIDAR, N.; BELATTAR, S.; ELAFI, M.; FEDDAOUI, M. Thermal non-destructive characterization of rail networks by using infrared thermography and FEM simulation. Journal of Nondestructive Evaluation, [s. l.], 2022.

[7] PINTO, M. F.; HONORIO, L. M.; MELO, A.; MARCATO, A. L. M. A robotic cognitive architecture for slope and dam inspections. Sensors, Basel, v. 20, n. 16, p. 4579, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/s20164579.

[8] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Guia de orientação e formulários para inspeções de segurança de barragem: volume II. Brasília, 2016.

[9] CHEN, C.-Y.; CHEN, S.-C.; CHEN, K.-H.; LIU, Z.-H. Thermal monitoring and

analysis of the large-scale field earth-dam breach process. Environmental Monitoring and Assessment, [s. l.], v. 190, n. 8, p. 483, 2018.

[10] ZHOU, R.; SU, H.; WEN, Z. Experimental study on leakage detection of grassed earth dam by passive thermography. NDT & E International, [s. l.], v. 126, p. 102588, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102588.

[11] MACHADO, G. de F. Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

[12] SESTREM, L. P. Concepção e implantação de um plano de instrumentação para avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

[13] FONSECA, A. R. Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica: estudo de caso das barragens da UHE São Simão. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

[14] AFFONSO, H. M. M. Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento. 2004. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

[15] PETRIE, G.; TOTH, C. K. Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

[16] SHAN, J.; TOTH, C. Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

[17] DI PASQUALE, A. et al. Monitoring Strategies of Earth Dams by Ground-Based Radar Interferometry: How to Extract Useful Information for Seismic Risk Assessment. Sensors, v. 18, n. 1, p. 244, 2018.

[18] FERRAZ, C. A. de M.; et al. O uso de geotecnologias como uma nova ferramenta para o controle externo. Revista do TCU, Brasília, p. 14–22, 2015.

[19] FERREIRA, M. E.; COSTA, J. V. S. Uso de veículos aéreos não tripulados no monitoramento e perícia ambiental de barragens no estado de Goiás. São Paulo, 2017.

[20] COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, [s. l.], v. 92, p. 79–97, 2014.

[21] BAGAVATHIAPPAN, S.; LAHIRI, B.B.; SARAVANAN, T.; PHILIP, J.; JAYAJUMAR, T. Infrared thermography for condition monitoring – A review. Infrared Physics & Technology 60 (2013) 35–55

[22] SU, H.; WEN, Z.; QIAN, C. Cellular automata-based analysis for seepage failure process of earth-rock dam. Structural Control and Health Monitoring, [s. l.], v. 27, e2553, 2020.

[23] YONGBIAO, L. Prediction methods to determine stability of dam if there is piping.

IERI Procedia, [s. l.], v. 1, p. 131–137, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ieri.2012.06.021.

[24] SILVA, R. Estudo da termografia por infravermelho: aplicações na engenharia e determinação de parâmetros termofísicos e geométricos de materiais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

[25] PLAYÀ-MONTMAY, N. TATTERSALL, G. Spot size, distance and emissivity errors in field applications of infrared thermography Methods Ecol Evol. 2021;12:828–840. 2021

[26] MALDAGUE, X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. Hoboken: Wiley, 2001.

[27] IBARRA-CASTANEDO, C.; SFARRA, S.; KLEIN, M.; MALDAGUE, X. Solar loading thermography: time-lapsed thermographic survey and advanced thermographic signal processing for the inspection of civil engineering and cultural heritage structures. Infrared Physics & Technology, [s. l.], v. 82, p. 56–74, 2017.

[28] EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. de. Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding. Construction and Building Materials, [s. l.], v. 51, p. 187–197, 2014.

[29] KAYODE, O. T.; ODUKOYA, A. M.; ADAGUNODO, T. A.; A. A. Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Bristol, v. 173, p. 012031, 2018. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/173/1/012031.

[30] BAUER, E.; PAVON, E.; BARREIRA, E.; CASTRO, E. Analysis of building façade defects using infrared thermography: laboratory studies. Journal of Building Engineering, [s. l.], v. 6, p. 93–104, 2016

[31] CHEN, C.-Y.; CHEN, S.-C.; CHEN, K.-H. Earth dam monitoring by using infrared thermography detection. Proceedings of Engineering and Technology Innovation, [s. l.], v. 4, p. 40–42, 2016.

[32] JUNIOR, A.; BATISTA, P. PÓVOAS, Y. Verificação de Descolamento Cerâmico de Fachada por Meio da Termografia Infravermelha. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v.5, n. 3, p. 10-16, 2020

[33] QUESADA, J. I.; LUCAS-CUEVAS, A.; PALMER, R.; PÉREZ-SORIANO, P.; ANDA, R. Definition of the thermographic regions of interest in cycling by using a factor analysis. Infrared Physics & Technology, [s. l.], v. 71, p. 180–186, 2016.

[34] BARROS, E. J. M. (2024) – “Proposta da utilização da termografia infravermelha embarcada em RPA nos procedimentos de inspeção de barragem de mineração”, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental), Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí

[35] LIMA, M. O. (2025) – “Avaliação da termografia infravermelha embarcada em RPA para detecção de surgências em uma barragem de mineração considerando variáveis operacionais e ambientais”, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental), Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará, Tucuruí.

 FOTO 3x4	**Murilo Lima** Engenheiro de Produção e Sistemas pela Universidade Estadual de Santa Cruz, especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Faculdade de Tecnologia e Ciência (FTC) e Sistemas Minero-Metalúrgicos pela Universidade de Ouro Preto (UFOP) e Mestre em Engeharia de barragens e Gestão. Com atuação empresarial nas áreas de segurança do trabalho e emergências na indústria de mineração com experiência em operacionalização de PAEBM.
 FOTO 3x4	**Eudes BARROS** Engenheiro de Produção e Sistemas pela Universidade Estadual de Santa Cruz, especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Faculdade de Tecnologia e Ciência (FTC) e Sistemas Minero-Metalúrgicos pela Universidade de Ouro Preto (UFOP). Com 12 anos de experiência em segurança do trabalho e emergência em mineração atuando com operacionalização de PAEBM.
 FOTO 3x4	**Fernanda GOUVEIA** Doutora em Estruturas e Construção Civil pela UnB, Especialista em Eng. Geotécnica aplicada à Mineração pelo Instituto Minere - BH. Professora titular na Universidade Federal do Pará (UFPA), Faculdade de Engenharia Civil e do quadro permanente do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental (PEBGA) desenvolvendo pesquisas nas áreas de Segurança de Barragens, Gestão de Riscos, Monitoramento, Ensaios geotécnicos.

CAIXAS SUECAS: DESEMPENHO, MANUTENÇÃO E AUTOMAÇÃO DE MEDIDORES HIDROSTÁTICOS EM BARRAGENS

Vinicius da Mota WEDEKIN
Engenheiro Civil - YTA-Y-YBY ENGENHARIA

Bárbara CHIODETO
Engenheira Civil, MsC - YTA-Y-YBY ENGENHARIA

Tsuioshi MIURA
Engenheiro Civil - YTA-Y-YBY ENGENHARIA

RESUMO

Popularmente conhecidos no Brasil como Caixas Suecas, os medidores hidrostáticos são instrumentos utilizados no controle de deslocamentos verticais em diferentes profundidades do maciço, podendo ser utilizados durante as fases de construção e de operação de aterros. Considerado um instrumento robusto, de baixo custo e fácil instalação e operação, foi desenvolvido na Suécia na década de 1940 e teve ampla adesão mundial nas décadas seguintes, principalmente para o monitoramento de barragens. A partir dos anos 2000 estes medidores tiveram seu uso reduzido em função do desenvolvimento novas tecnologias, entretanto, a depender de correta manutenção, as Caixas Suecas continuam sendo uma ferramenta eficaz para o controle de recalques. Ademais, devido sua robustez, são muito aplicadas em barragens de enrocamento considerando-se as especificidades das condições de construção. Implementar manutenção com frequência mínima anual é fundamental para assegurar a precisão e a confiabilidade das medições do instrumento. Análises de dados obtidos em instrumentos instalados há mais de 40 anos no Brasil indicam confiança e estabilidade das leituras, mas sempre relacionado ao cuidado com o instrumento durante este tempo de vida. A automação deste tipo de instrumento permite soluções com diferentes graus de autonomia, permitindo inclusive a incorporação da injeção de água e realização de leituras diárias, melhorando significativamente a precisão e constância das leituras, além de manter o sistema condutor sempre preenchido.

ABSTRACT

Popularly known in Brazil as “Caixas Suecas”, hydrostatic settlement gauges are instruments used to monitor vertical displacements at different depths within an embankment mass, and they can be applied during both the construction and operational phases of earthfill structures. Considered robust, low-cost, and easy to install and operate, these instruments were developed in Sweden in the 1940s and gained widespread global adoption in the following decades, particularly for dam monitoring. Since the 2000s, their use has declined due to the development of new technologies; however, when properly maintained, Swedish settlement gauges remain an effective tool for settlement control. Furthermore, because of their

durability, they are widely used in rockfill dams, taking into account the specific conditions of their construction. Implementing maintenance at least annually is essential to ensure the accuracy and reliability of the instrument's measurements. Analyses of data obtained from instruments installed more than 40 years ago in Brazil indicate reliable and stable readings, always associated with proper care throughout their service life. The automation of this type of instrument enables solutions with varying degrees of autonomy, including the incorporation of water injection and the performance of daily readings. Automating hydraulic settlement gauges significantly improves the precision and consistency of measurements while also ensuring that the conveying system remains continuously filled.

1. INTRODUÇÃO

Os medidores hidrostáticos de recalques verticais em barragens de terra, popularmente conhecidos no Brasil como caixas suecas[1], derivam dos dispositivos desenvolvidos na década de 1940 pela equipe de Torsten Kallstenius, chefe do departamento de mecânica do *Swedish Geotechnical Institute* (SGI), para o monitoramento dos aterros sobre solos moles. Tais medidores tiveram seu uso ampliado nos programas de instrumentação de barragens europeias na década de 1950, com adesão mundial a partir dos anos 1960.

A despeito disto, Basset, 2012 (1) cita que, provavelmente, a técnica para medição dos deslocamentos verticais por medidores hidráulicos é a mais simples e remonta períodos pré-Romanos.

No Brasil a utilização das caixas suecas foi difundida nas décadas de 1970 e 1980 em obras de infraestrutura, com destaque para as hidrelétricas implantadas pelas principais companhias de geração de energia nacionais como FURNAS, CEMIG, CESP, CHESF, dentre outras. Cruz, 1996 (2) apresenta a descrição dos principais instrumentos implantados em uma centena de grandes barragens brasileiras, incluindo caixas suecas para monitoramento de recalques em barragens de terra e enrocamento.

O funcionamento das caixas suecas baseia-se no princípio dos vasos comunicantes, sendo constituídos por uma célula de concreto instalada no interior do maciço conectada a um painel de leitura por meio de mangueiras de nylon transparentes e flexíveis. Dunnicliff, 1988 (3) indica detalhes da implantação do sistema, cujos tubos se estendem do interior da caixa até a face de jusante do maciço, onde é implantada uma cabine que abriga painéis com réguas graduadas para realizar as leituras de deslocamento, cuja precisão é de +/- 3,0 mm.

A **Figura 1** ilustra o medidor hidrostático de recalque apresentado pelo autor (3).

[1] Os seguintes termos são comumente indicados em publicações internacionais para designar medidores hidrostáticos de recalques: 'Swedish settlement gauge', 'hydrostatic settlement gauge', 'fluid settlement gauge geotechnical', 'hydraulic settlement cells embankment dams' e 'single point hydraulic level gauges'.

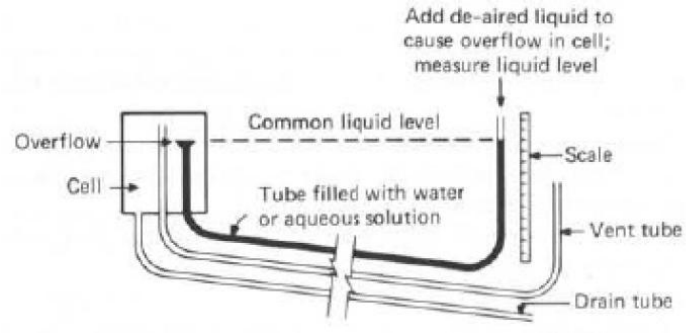


Figura 1 – Medidor hidrostático de recalque. Fonte: Dunnicliff, 1988 (3).

2. HISTÓRICO

A engenharia geotécnica na Suécia possui longa tradição fomentada pelas condições geológicas, com predominância de espessos depósitos de argilas moles e compressíveis. Massarsch & Fellenius, 2012 (4) citam que os Vikings selecionavam seus principais assentamentos e entrepostos comerciais em ambientes pantanosos visando dificultar os ataques inimigos.

Os autores (4) creditam a Christopher Polhem a fundação da primeira “Escola de Engenharia” da Suécia, em 1697, sendo reconhecido por suas invenções, como um equipamento para cravar estacas inclinadas, descrito nos anais de 1753 da Real Academia Sueca de Ciências (**Figura 2-a**). No século XIX diversas obras de engenharia importantes foram realizadas no país, como a construção do Canal de Göta, por Baltzar von Platen, com 195 km de extensão, conectando o Mar Báltico ao Mar do Norte (**Figura 2-b**).

Massarsch & Fellenius (4) citam que, após a ocorrência de uma série de deslizamentos de terra em meados da década de 1910, a Companhia Ferroviária Estatal Sueca instituiu a "Comissão Geotécnica da Companhia Ferroviária Estatal", sob a presidência de Gerald DeGeer e, posteriormente, de Wolmar Fellenius, cujo relatório final é considerado como a primeira publicação a adotar a palavra "geotécnica". Posteriormente, em 1936, Walter Kjellman, aluno de Karl Terzaghi, foi nomeado o primeiro chefe do Departamento de Geotecnia da Autoridade Nacional de Estradas da Suécia, restabelecido em 1944 como o atual Instituto Sueco de Geotecnia (SGI, *Swedish Geotechnical Institute* - https://www.sgi.se/en).

No campo do monitoramento, o sueco Torsten Kallstenius, então chefe do departamento de mecânica da SGI, foi responsável pelo desenvolvimento de diversos instrumentos da engenharia geotécnica como piezômetros hidráulicos, dispositivos de medição de recalque, o inclinômetro SGI e diferentes tipos de penetrômetros, com destaque para o Iskymeter (**Figura 2-c**) e amostradores de pistão. Diante deste contexto, Kallstenius é internacionalmente considerado um dos precursores no desenvolvimento de instrumentos para o monitoramento geotécnico.

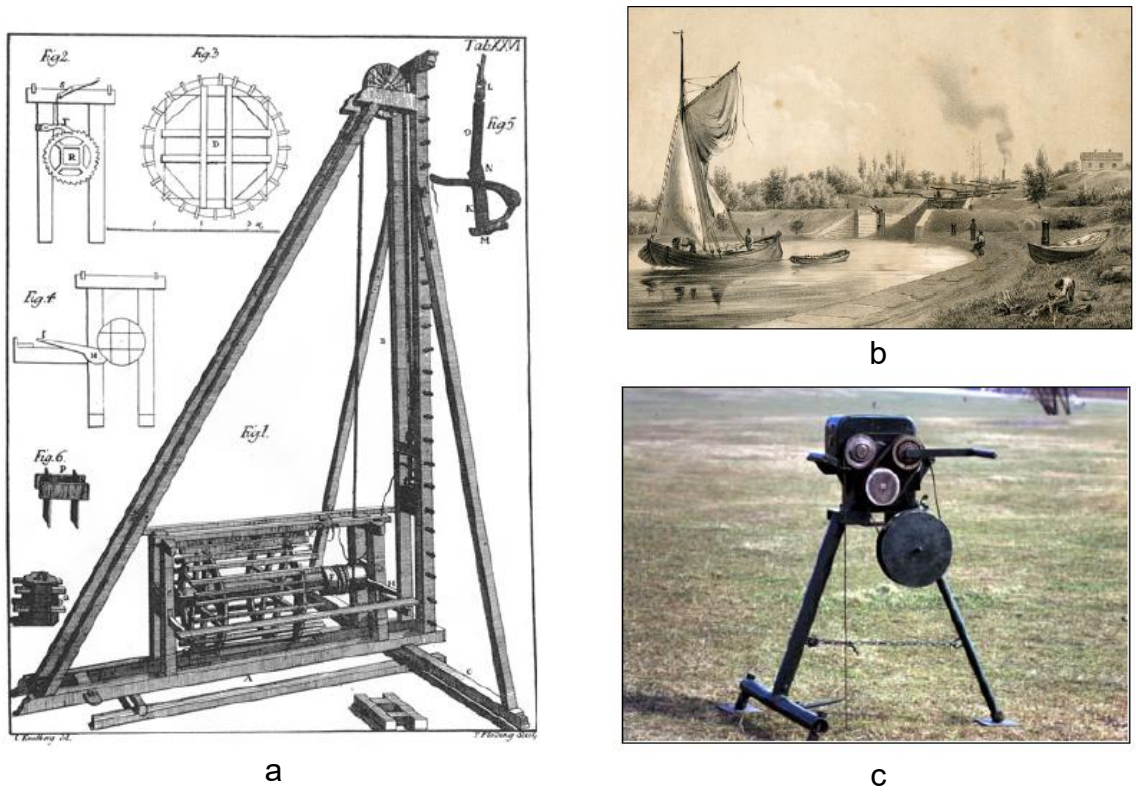


Figura 2 – A tradição da engenharia geotécnica Sueca: (**a**) Equipamento de cravação de estacas projetado por Christopher Polhem para a construção de eclusa em Estocolmo; (**b**) Vista do Canal de Göta (1840); (**c**) Iskymeter, desenvolvido por Torsten Kallstenius. Fonte: Massarsch & Fellenius, 2012 (4).

Flodin & Broms, 1981 (5) descrevem em *A History of Civil Engineering in Soft Clay* como a engenharia sueca evoluiu das práticas empíricas para a observação sistemática, realização de ensaios de campo e instrumentação geotécnica em solos moles. Os autores citam os campos instrumentados de Skå-Edeby, Väsby e diversas obras rodoviárias e aeroportuárias como os propulsores do desenvolvimento dos sistemas hidráulicos de monitoramento. Silveira, 2006 (6) reitera que as células hidráulicas de recalques que utilizam o princípio de vasos comunicantes são nacionalmente conhecidas por caixas suecas por terem sido os suecos os pioneiros a utilizarem estes dispositivos na instrumentação de barragens.

2.1 O reconhecimento internacional dos medidores hidráulicos de recalque

Hanna, 1985 (7) cita que um dos primeiros dispositivos para medição de recalques por sistemas hidráulicos que adotam o princípio de vasos comunicantes foi introduzido por Terzaghi, 1938 (8), no final da década de 1930. O autor (7) credita ao Laboratório de pesquisa de transporte e rodovias do Reino Unido o desenvolvimento de diversas publicações a cerca destes instrumentos (*single point hydraulic level gauges*), dentre elas a publicação de Irwin, 1964 (9). A **Figura 3** apresenta esquemas de medidores hidráulicos citados pelo autor (7).

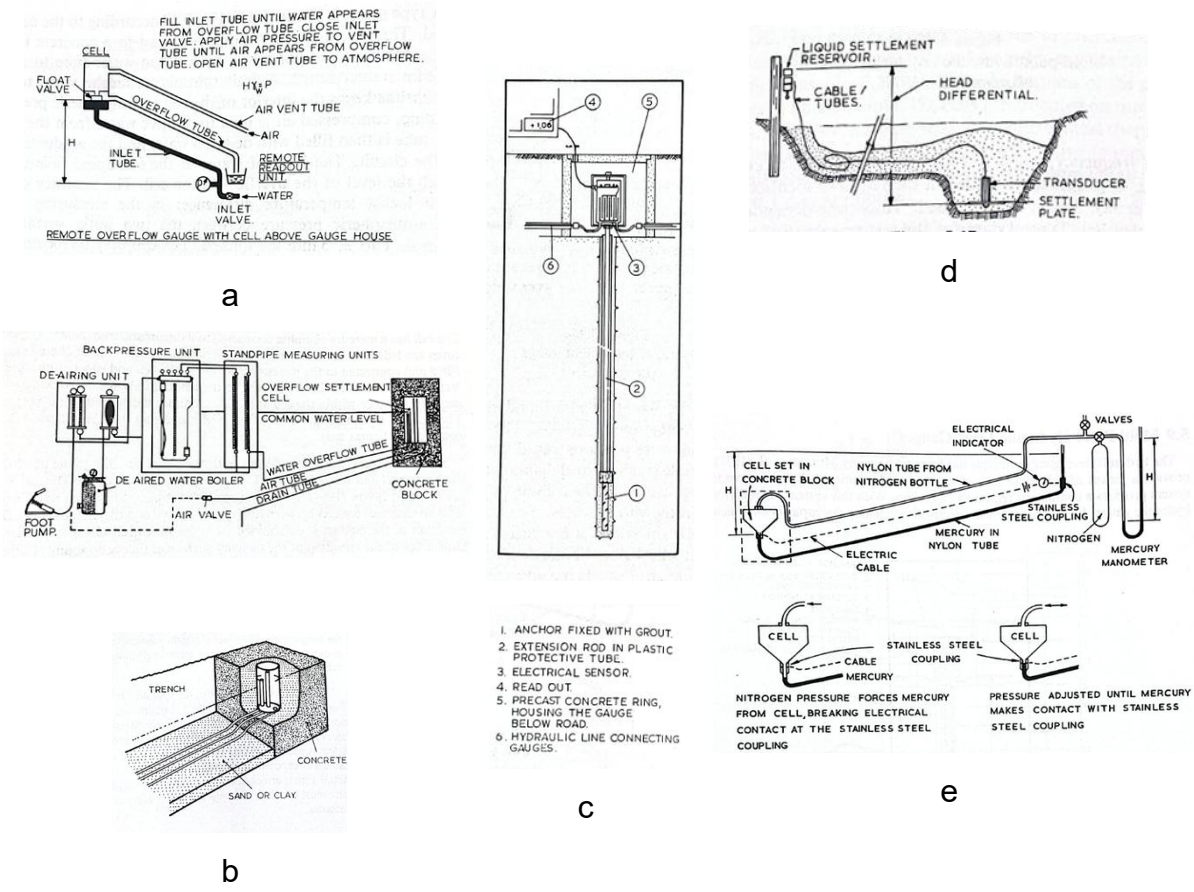


Figura 3 – Diferentes esquemas de medidores hidráulicos indicados por Hanna, 1985 (7): (**a**) medidor de recalque por transbordamento; (**b**) medidor hidráulico de recalque por transbordamento produzido pela Soil Instruments Ltd.; (**c**) medidor hidráulico multiponto de recalque. In: Muller et.al, 1977 (10); (**d**) medidor de recalque por líquido com corda vibrante. In: Ground Engineering, 1983 (11); (**e**) medidor de recalque por mercúrio. In: Irwin, 1964 (9).

Michael Bozozuk, geotécnico da Divisão de Pesquisa em Construção do Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá, descreveu um instrumento utilizado para determinar recalques verticais através da medição da pressão hidrostática em uma mangueira flexível preenchida com fluido, posicionada horizontalmente sob uma estrutura de engenharia - Bozozuk, 1969 (12). Segundo o autor, as pressões seriam medidas com um dispositivo tipo torpedo contendo um transdutor de pressão, que, ao ser puxado através da mangueira, permitiria a medição contínua dos recalques ao longo de seu comprimento (**Figura 4**). Bozozuk & Fellenius, 1979 (13) indicam a evolução técnica do instrumento citado em 1969 (12), incluindo a colaboração do engenheiro sueco Bror Fellenius, filho de Wolmar Fellenius, citado na introdução deste capítulo.

Entre as décadas de 1960 e 1970, o geotécnico britânico John Dunnicliff publicou uma série de artigos sobre sistemas hidráulicos para medição de recalques, dentre os quais destacam-se: Dunnicliff, 1968 (14) e Dunnicliff, 1971 (15). Entretanto, de fato, a padronização e a consolidação das técnicas atuais de instalação e manutenção dos medidores hidrostáticos de recalques ocorreu após a publicação do livro *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance* pelo geotécnico em 1988 (3), cuja obra teve enorme circulação internacional, especialmente nos Estados Unidos e Canadá.

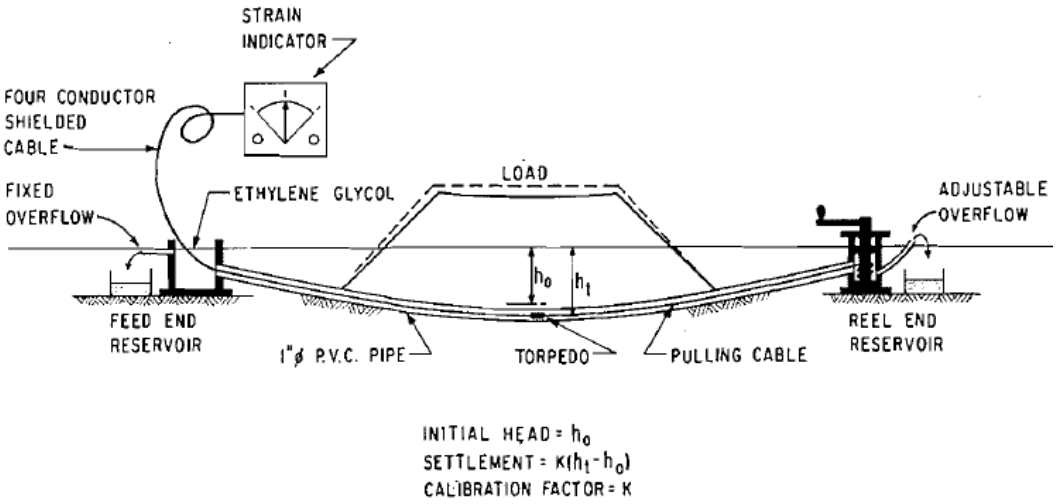


Figura 4 – Medidor de recalques hidráulico. Fonte: Bozozuk, 1969 (12).

Basset, 2012 (1) publicou o livro *A Guide to Field Instrumentation in Geotechnics*, apresentando princípios, técnicas de instalação e de leitura para monitoramento de estruturas geotécnicas, incluindo temas contemporâneos como a automação de instrumentos e transmissão remota de dados.

2.3 A consolidação das caixas suecas no monitoramento de barragens

Entre 1950 até o início da década de 1970 a Suécia expandiu a geração de energia por hidroelétricas através do *Swedish State Power Board* (atual Vattenfall - https://group.vattenfall.com), ampliando e consolidando a instrumentação, assim como o uso dos medidores hidrostáticos de recalque em barragens de terra e enrocamento como Höljes (em Klarälven), Suorva (região de Stora Sjöfallet) e Ajaure (rio Skellefte).

Em 1969 o ICOLD publicou o Bulletin 21 - *General considerations applicable to instrumentation for earth and rockfill dams* (16), sendo considerada a pioneira formalização internacional ampla para instrumentação de barragens de terra e enrocamento. A referida publicação indica finalidade da instrumentação, planejamento de sistemas, tipos de instrumentos aplicáveis, fatores que influenciam a precisão das medições, confiabilidade das medições e exemplos de barragens instrumentadas. Após duas décadas, o Boletim 60 do ICOLD (17) publicado em 1988, atualizou e consolidou os Boletins nº 21 (instrumentação de barragens de terra e enrocamento) e nº 23 (instrumentação de barragens de concreto).

Após publicação das diretrizes técnicas para instrumentação publicadas por Hanna, 1985 (7) e Dunnicliff em 1988 (3) e pelo ICOLD (17), o Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA - USACE, 1995 (18) padronizou o uso de medidores hidrostáticos para controle de deslocamentos verticais em diferentes profundidades de diques e barragens de terra e enrocamento norte-americanos, consolidando a técnica para tal finalidade.

No contexto histórico nacional, Cruz, 1996 (2) apresenta a descrição dos principais instrumentos implantados em grandes barragens brasileiras, incluindo caixas suecas para monitoramento de recalques em barragens de terra e enrocamento.

Em 2000 o ICOLD publicou o Boletim 118 (19), abordando diretrizes e estudos de caso de sistemas automatizados de monitoramento de barragens.

Levantamento realizado pelos autores deste artigo em aproximadamente uma centena de barragens brasileiras de diferentes tipologias e finalidades, abrangendo os setores de geração de energia, mineração e saneamento, conclui que os medidores hidrostáticos de recalque são utilizados em cerca de 10% destes empreendimentos, com aplicação predominantemente associada às barragens de enrocamento.

Essa predominância está relacionada às características construtivas e operacionais deste tipo de instrumento, que podem ser instaladas em etapas específicas da execução do barramento, sem interferir significativamente nas camadas subsequentes da estrutura, diferentemente de instrumentos que necessitam ser alteados conjuntamente com o avanço construtivo do maciço.

3. PRINCÍPIOS, DESEMPENHO E MANUTENÇÃO

Os medidores de recalque tipo caixas suecas são mecanicamente robustos e permitem o monitoramento de grandes magnitudes de recalque, características particularmente importantes em barragens de enrocamento, onde são esperados deslocamentos verticais significativos e condições construtivas mais severas. Neste contexto, os medidores hidrostáticos demonstram compatibilidade com os esforços e interferências inerentes ao lançamento e compactação de materiais de granulometria grosseira, condição frequentemente incompatível com instrumentos mais sensíveis ou dependentes de alteamentos sucessivos durante a construção do aterro.

Por outro lado, observa-se que a utilização destes instrumentos é relativamente limitada em barragens executadas com aterros de solo compactado. Nesses casos, o monitoramento dos deslocamentos verticais normalmente é realizado por métodos economicamente mais viáveis, como placas de recalque. Contudo, apesar do processo de monitoramento ser amplamente padronizado, costuma ser integrado às rotinas das equipes de controle topográfico da obra e não às equipes especializadas de instrumentação.

3.1 Princípios de Funcionamento dos Medidores Hidrostáticos

Conforme apresentado anteriormente, os medidores hidrostáticos de recalque, ou caixas suecas, baseiam-se no princípio dos vasos comunicantes, utilizando células enterradas conectadas hidraulicamente a painéis de leitura instalados em regiões acessíveis da barragem.

Embora conceitualmente simples, o adequado funcionamento destes instrumentos depende diretamente da estabilidade hidráulica do sistema, especialmente da

ausência de bolhas de ar, da estanqueidade das conexões e da correta estabilização das colunas d'água.

Os instrumentos normalmente utilizam duas linhas hidráulicas independentes, permitindo redundância operacional e validação das leituras. A diferença entre as colunas constitui importante parâmetro de confiabilidade operacional, sendo utilizada como critério para identificação de anomalias hidráulicas e falhas de estabilização.

A diferença entre as duas colunas constitui um importante critério de confiabilidade operacional. Durante as leituras, desvios superiores à tolerância operacional estabelecida (±5 mm) indicam anomalias hidráulicas, tais como presença de bolhas de ar, obstruções, vazamentos ou falhas de estabilização do sistema. Desta forma, o próprio instrumento apresenta um mecanismo intrínseco de validação das leituras, característica que representa uma das principais vantagens deste tipo de instrumentação.

Além da leitura diferencial, a interpretação dos recalques exige ainda o controle topográfico da cabine de leitura, uma vez que eventuais deslocamentos da estrutura de referência também influenciam o resultado final. A leitura definitiva do recalque é obtida pela diferença entre a leitura atual e a leitura inicial do instrumento, acrescida da correção topográfica da cabine.

Apesar da simplicidade conceitual do sistema, seu desempenho está diretamente relacionado à correta execução dos procedimentos hidráulicos e à manutenção periódica dos componentes, especialmente mangueiras, conexões e fluido de preenchimento. A **Figura 5** ilustra esquema de funcionamento do medidor hidrostático de recalque instalado em barragem.

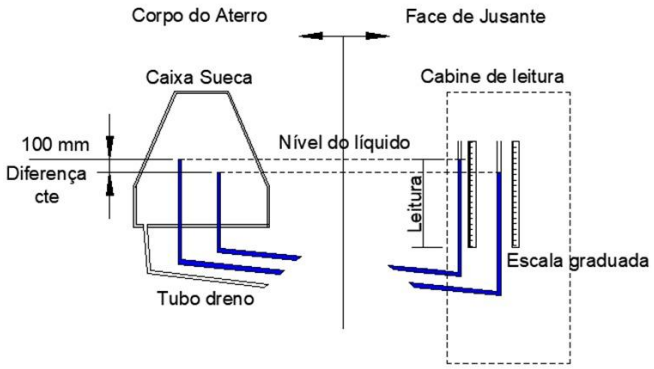


Figura 5 – Esquema de funcionamento do medidor hidrostático de recalque. Adaptado de Dunnicliff, 1988 (3).

3.2 Principais Fatores de Degradação e Instabilidade

Embora as caixas suecas apresentem elevada robustez e longa vida útil operacional, sua confiabilidade depende diretamente das condições hidráulicas internas do sistema. As avaliações realizadas pelos autores do presente artigo em diferentes estruturas permitiram identificar que a maior parte das falhas operacionais observadas não está associada à célula enterrada propriamente dita, mas sim à degradação progressiva dos componentes hidráulicos e à ausência de manutenção preventiva.

Entre os principais fatores de degradação observados destacam-se a presença de (i) bolhas de ar, (ii) o desenvolvimento de biofilmes e microrganismos que causam obstruções parciais das mangueiras, além da (iii) perda de estanqueidade em conexões e de (iv) falhas operacionais durante os procedimentos de leitura.

A presença de bolhas de ar constitui uma das principais causas de instabilidade das leituras. Devido à compressibilidade do ar, o sistema passa a apresentar amortecimento hidráulico e resposta lenta à estabilização das colunas d'água, resultando em leituras inconsistentes e baixa repetibilidade. Em situações mais severas foram observadas diferenças permanentes entre as colunas, incompatíveis com o padrão hidráulico teórico do instrumento.

Também foram identificadas ocorrências relacionadas à proliferação de algas, biofilmes e acúmulo de sedimentos no interior das mangueiras, especialmente em sistemas sem manutenção periódica ou submetidos ao uso de água inadequada. Esses materiais reduzem a transparência das mangueiras, dificultam a circulação hidráulica e favorecem o aprisionamento de bolhas de ar.

Problemas de estanqueidade também se mostraram recorrentes em instrumentos antigos ou submetidos a longos períodos sem manutenção. Em alguns casos, verificou-se infiltração externa e ruptura parcial de componentes hidráulicos, ocasionando colmatação por sedimentos e perda da estabilização adequada das colunas d'água.

Além dos aspectos hidráulicos, também foram observadas falhas operacionais relacionadas à ausência de padronização dos procedimentos de leitura. Entre as principais ocorrências destacam-se leituras realizadas sem tempo adequado de estabilização, injeção insuficiente de água, interpretação inadequada do menisco e ausência de verificação da diferença entre as duas linhas hidráulicas.

Os resultados obtidos demonstram que a confiabilidade das caixas suecas depende não apenas da integridade física dos instrumentos, mas principalmente da manutenção das condições hidráulicas e da correta execução dos procedimentos operacionais.

A **Figura 6** apresenta condições encontradas pelos autores durante manutenção de sistemas hidráulicos de recalques instaladas em barragens brasileiras. Nota-se: (a) presença de sujidade, (b) algas, (c) bolhas e (d) perda de estanqueidade por ruptura da mangueira na junta do painel de leitura. Destaca-se que após a adequada manutenção os sistemas tiveram seu funcionamento plenamente restabelecido.

3.3 Influência da Manutenção Preventiva na Confiabilidade

A manutenção de frequência anual dos sistemas hidráulicos é fundamental para assegurar a precisão e a confiabilidade das medições. O procedimento envolve a limpeza das peças aparentes e a circulação forçada de fluido destilado, garantindo a eliminação de bolhas de ar, sujidade, insetos e microrganismos no interior das mangueiras.

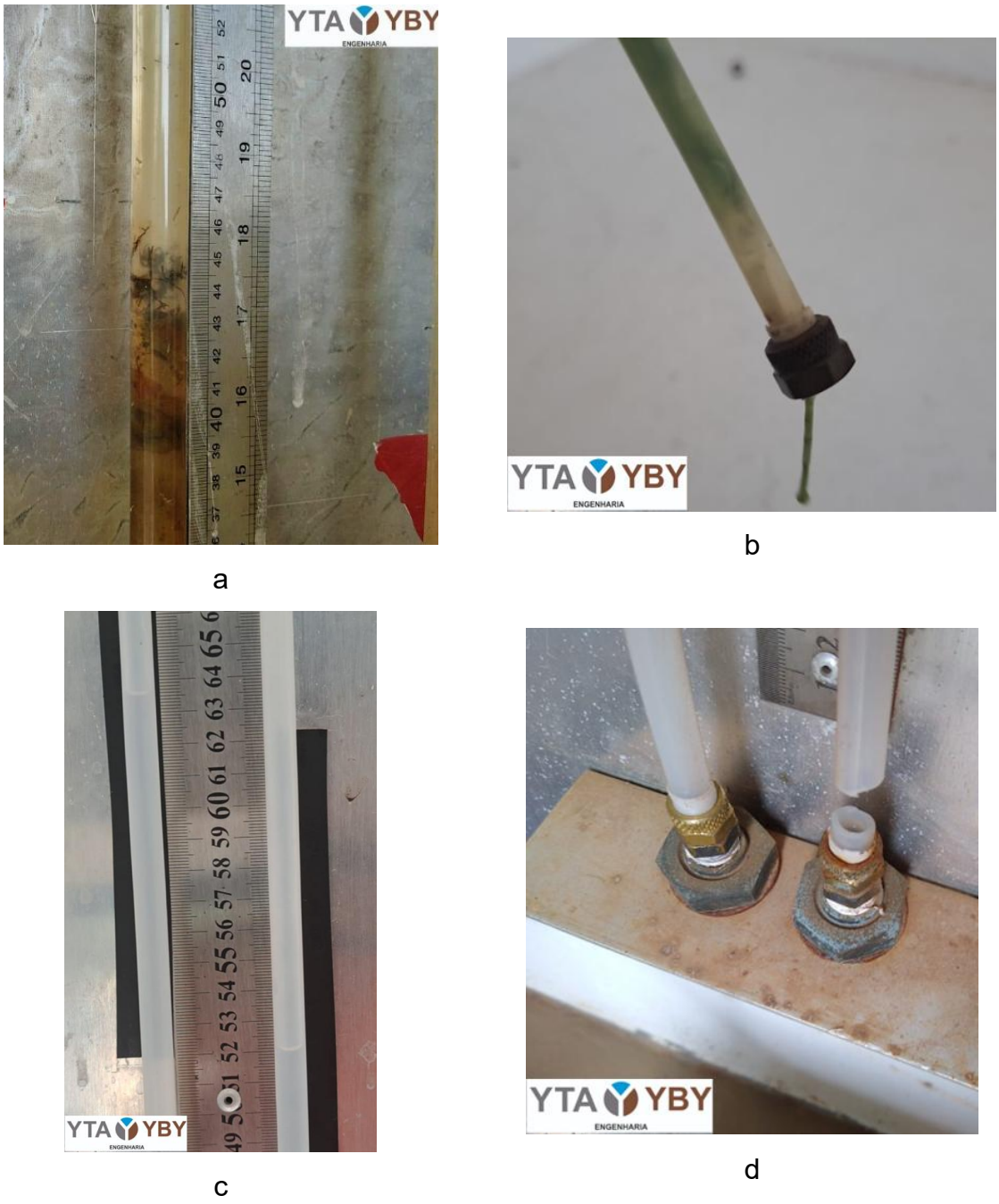


Figura 6: Manutenção de caixas suecas: (**a**) presença de sujidade; (**b**) ocorrência de algas e de (**c**) bolhas; (**d**) perda de estanqueidade por ruptura da mangueira na junta do painel de leitura. Imagens fornecidas pelos autores.

Os procedimentos de manutenção preventiva devem considerar principalmente a desmontagem das mangueiras, o esgotamento completo do sistema hidráulico, a substituição de componentes degradados, a recirculação de água deaerada e a estabilização final das colunas d'água.

Visando avaliar o comportamento operacional de sistemas submetidos a diferentes estratégias de manutenção, incluindo empreendimentos com manutenção preventiva contínua e sistemas que permaneceram longos períodos sem intervenções hidráulicas

adequadas, os autores diferenciaram quatro tipologias de empreendimentos (todas barragens de enrocamento, com alturas variando entre 55 e 140 m). São elas:

- A: empreendimento implantado originalmente na década de 1960, com sucessivos alteamentos ao longo de sua operação, com manutenção preventiva contínua (cerca de 15 anos);
- B: empreendimento novo, barragem construída entre 2010 e 2024, sem manutenção periódica sistematizada;
- C: empreendimento construído entre 1987 e 1994, sem manutenção periódica;
- D: experiência de automação em empreendimento sem manutenção periódica;

No empreendimento A observou-se histórico contínuo de manutenção preventiva anual desde a instalação em 2011, permitindo elevada estabilidade operacional dos instrumentos ao longo do tempo. As leituras obtidas apresentam consistência com os dados históricos e estabilidade das diferenças hidráulicas entre as duas linhas de leitura, evidenciando adequado funcionamento da maior parte dos instrumentos. Destaca-se que o único medidor hidrostático considerado definitivamente condenado apresentava indícios de falha estrutural irreversível da tubulação enterrada ou da própria célula interna do maciço, possivelmente associada aos elevados recalques históricos da estrutura.

Em contrapartida, nos empreendimentos B e C, verificou-se histórico limitado ou inexistente de manutenção preventiva sistemática. Nesses casos, observou-se maior incidência de leituras erráticas, degradação das mangueiras, presença de bolhas de ar e falhas de estabilização hidráulica.

Observou-se comportamento distinto entre os empreendimentos avaliados. Em um dos casos (B), embora o sistema fosse relativamente recente, verificaram-se indícios de falhas de instalação e operação desde sua implantação, incluindo utilização de água não tratada, ausência de padronização das mangueiras e procedimentos inadequados de leitura. No empreendimento C, apesar da implantação original apresentar melhor padronização construtiva, o sistema permaneceu longos períodos sem manutenção preventiva, favorecendo degradação hidráulica gradual ao longo do tempo.

A despeito destas observações, os procedimentos de manutenção corretiva permitiram recuperar operacionalmente parcela significativa dos instrumentos inicialmente considerados não confiáveis. No empreendimento B, por exemplo, dos 44 instrumentos avaliados, aproximadamente 90% puderam ser restabelecidos após os procedimentos hidráulicos de substituição das mangueiras, circulação de água e estabilização das colunas. Apenas cinco células apresentaram comportamento incompatível com critérios mínimos de confiabilidade, sendo consideradas condenadas após as intervenções.

No empreendimento C, embora alguns instrumentos tenham sido classificados como inoperantes ou parcialmente operacionais, verificou-se que os demais pontos mantiveram leituras coerentes e compatíveis com o histórico do empreendimento, reforçando a importância da manutenção periódica para preservação da confiabilidade do sistema.

Os resultados obtidos indicam forte correlação entre a frequência de manutenção preventiva e a estabilidade operacional das caixas suecas. Sistemas submetidos a manutenção contínua apresentaram maior disponibilidade operacional, menor incidência de leituras erráticas e menor taxa de condenação dos instrumentos. Por outro lado, sistemas sem manutenção periódica apresentaram maior degradação hidráulica, embora ainda com elevada capacidade de recuperação após intervenções corretivas adequadas.

Dessa forma, os resultados sugerem que a maior parte das falhas observadas possui origem predominantemente hidráulica e operacional, sendo frequentemente reversível por meio de manutenção corretiva apropriada.

Importante destacar que até as falhas identificadas num sistema com rotina de manutenção preventiva são melhor avaliadas, permitindo ter maior acurácia da causa dos problemas e determinar correlações com o comportamento geral da estrutura. Num cenário após longo período sem manutenção, as anomalias consideradas mais graves podem ser mascaradas por problemas hidráulicos sem maiores relação com o comportamento estrutural da barragem.

3.4 Desempenho de Longo Prazo das Caixas Suecas

As avaliações realizadas demonstram que medidores hidrostáticos de recalque podem apresentar vida útil operacional extremamente elevada quando submetidos a manutenção hidráulica adequada e procedimentos padronizados de leitura.

Foram avaliados instrumentos instalados há mais de quatro décadas em barragens brasileiras, os quais ainda apresentavam leituras estáveis, coerentes e compatíveis com os registros históricos. Tal comportamento evidencia que a longevidade operacional deste tipo de instrumentação está diretamente associada à conservação das condições hidráulicas internas do sistema e à manutenção periódica das mangueiras, conexões e fluido de preenchimento.

Os resultados observados também demonstram que a idade do instrumento, isoladamente, não representa critério suficiente para condenação operacional. Em diversos casos, instrumentos antigos apresentaram desempenho superior ao de sistemas mais recentes submetidos a longos períodos sem manutenção preventiva.

Dessa forma, conclui-se que a vida útil das caixas suecas está diretamente relacionada à estratégia de manutenção adotada, especialmente no que se refere à recirculação periódica da água, eliminação de bolhas de ar, controle microbiológico e padronização dos procedimentos de leitura.

Os resultados obtidos reforçam a elevada confiabilidade desta tecnologia quando corretamente instalada, operada e mantida, mesmo em estruturas de grande porte e com décadas de operação contínua.

3.5 Recomendações Técnicas

Baseados nas avaliações realizadas, recomenda-se que sistemas de medidores hidrostáticos de recalque sejam submetidos a programas periódicos de manutenção preventiva, minimamente anual, incluindo inspeção das mangueiras e conexões, substituição de componentes degradados, circulação de água deaerada e validação das leituras por comparação entre as linhas hidráulicas redundantes.

Recomenda-se também a utilização de água destilada ou deaerada, visando minimizar a formação de bolhas de ar e o desenvolvimento de microrganismos no interior das mangueiras. Os procedimentos de leitura devem ser rigorosamente padronizados, incluindo etapas de injeção controlada de água, tempo mínimo de estabilização e verificação da diferença admissível entre as duas colunas de leitura.

Adicionalmente, destaca-se a importância do treinamento contínuo das equipes de monitoramento, bem como da manutenção de registros históricos organizados e rastreáveis, permitindo avaliar tendências, identificar anomalias operacionais e validar o desempenho de longo prazo dos instrumentos.

4. AUTOMAÇÃO

Com maior viabilidade de aquisição de equipamentos e componentes mecânicos e eletrônicos de qualidade e precisão, a automação de sistemas de monitoramento geotécnico tem se consolidado nas últimas décadas como importante ferramenta para aumento da frequência de aquisição de dados, redução de erros operacionais e melhoria da confiabilidade dos sistemas de auscultação de barragens. Neste contexto, os medidores hidrostáticos de recalque (caixas suecas), tradicionalmente associados a leituras manuais, também passaram a receber soluções voltadas à automação parcial ou integral do processo de monitoramento.

Apesar disso, a automação deste tipo de instrumento ainda é relativamente pouco difundida, principalmente em razão das particularidades hidráulicas envolvidas em seu funcionamento. Diferentemente de outros instrumentos geotécnicos, cujo monitoramento pode ser automatizado apenas com a substituição do procedimento manual por sensores eletrônicos, as caixas suecas dependem diretamente das condições hidráulicas internas do sistema, incluindo preenchimento adequado das mangueiras, ausência de bolhas de ar, estabilização das colunas d’água e renovação periódica do fluido de leitura.

Dessa forma, a simples instalação de sensores eletrônicos para leitura do nível hidráulico não garante, isoladamente, a confiabilidade do monitoramento automatizado.

4.1 Limitações do Processo Manual de Leitura

Embora o procedimento manual das caixas suecas seja relativamente simples e apresente baixo custo operacional, sua execução depende diretamente da experiência e padronização da equipe responsável pelas leituras.

O processo tradicional envolve injeção manual de água, estabilização das colunas hidráulicas, leitura visual do menisco e validação da diferença entre as duas linhas de leitura. Pequenas variações operacionais podem introduzir erros significativos, especialmente em sistemas de grande extensão hidráulica ou submetidos a degradação parcial das mangueiras e conexões.

Entre os principais fatores associados às incertezas operacionais destacam-se:

- insuficiência de injeção de água;
- leitura realizada antes da estabilização completa do sistema;
- interpretação incorreta do menisco;
- presença de bolhas de ar;
- falhas de vedação;
- ausência de padronização do procedimento;
- erros de transcrição manual dos dados.

Além disso, campanhas manuais normalmente apresentam frequência reduzida, limitada por questões operacionais, logísticas e de disponibilidade de equipe técnica. Em muitos empreendimentos, as leituras são realizadas apenas mensalmente ou até mesmo em intervalos superiores, dificultando a identificação precoce de variações anômalas ou eventos transitórios de recalque.

As avaliações realizadas em campo também evidenciaram que falhas operacionais e inconsistências de registro podem comprometer significativamente a interpretação dos dados históricos de monitoramento, reforçando a importância da automação como ferramenta de controle de qualidade e rastreabilidade das leituras.

4.2 Limitações das Soluções de Automação Simplificadas

Em muitos casos, soluções de automação são concebidas considerando exclusivamente a substituição da leitura visual do menisco por sensores eletrônicos de pressão ou sensores de nível instalados diretamente nos painéis das caixas suecas.

Embora essa abordagem permita aquisição automática dos níveis hidráulicos, ela não resolve integralmente os principais mecanismos de degradação operacional do sistema hidráulico.

A confiabilidade das caixas suecas depende não apenas da medição do nível hidráulico, mas principalmente da garantia de adequado funcionamento do circuito hidráulico interno. Sistemas sem renovação periódica da água estão sujeitos ao efeito de evaporação da água, ao acúmulo de bolhas de ar, desenvolvimento de biofilmes, sedimentação e perda gradual da estabilidade hidráulica, comprometendo a qualidade das leituras mesmo na presença de sensores eletrônicos de elevada precisão.

Dessa forma, a automação efetiva deste tipo de instrumento deve contemplar não apenas a aquisição eletrônica das leituras, mas também a automação do próprio processo hidráulico de enchimento, recirculação e estabilização das colunas d'água.

Os resultados observados em campo indicam que sistemas automatizados submetidos a renovação frequente do fluido tendem a apresentar maior estabilidade operacional, redução significativa de bolhas de ar e menor incidência de leituras erráticas quando comparados a sistemas exclusivamente manuais.

4.3 Desenvolvimento de uma Metodologia para Automação do Processo Hidráulico

A automação de medidores hidrostáticos de recalque apresenta um desafio particular quando comparada à maioria dos instrumentos geotécnicos convencionalmente automatizados. Enquanto, em muitos casos, a automação consiste basicamente na substituição da leitura manual por sensores eletrônicos, nas caixas suecas a confiabilidade da medição depende diretamente das condições hidráulicas do sistema no instante da leitura. Dessa forma, a simples instrumentação eletrônica do painel de leitura não elimina as principais fontes de incerteza inerentes ao funcionamento hidráulico do instrumento.

Com base nessa premissa, foi desenvolvida uma metodologia de automação voltada não apenas à aquisição automática das leituras, mas principalmente ao condicionamento hidráulico do sistema antes de cada ciclo de monitoramento (**Figura 7**). O objetivo foi reproduzir, de forma automática e padronizada, as etapas essenciais tradicionalmente executadas pelos operadores durante as campanhas manuais, preservando os princípios de funcionamento originalmente concebidos para as caixas suecas e reduzindo a influência das variáveis operacionais.

A metodologia foi aplicada em um conjunto de medidores hidrostáticos previamente instalados em uma barragem de enrocamento, originalmente destinados apenas à operação manual. Uma das premissas adotadas durante o desenvolvimento consistiu em preservar integralmente a instrumentação existente, evitando intervenções no interior do maciço e mantendo a possibilidade de realização de leituras manuais sempre que necessário. Dessa forma, toda a solução foi concebida como um sistema complementar, capaz de ser incorporado a instalações existentes sem alterar o princípio de funcionamento dos instrumentos.

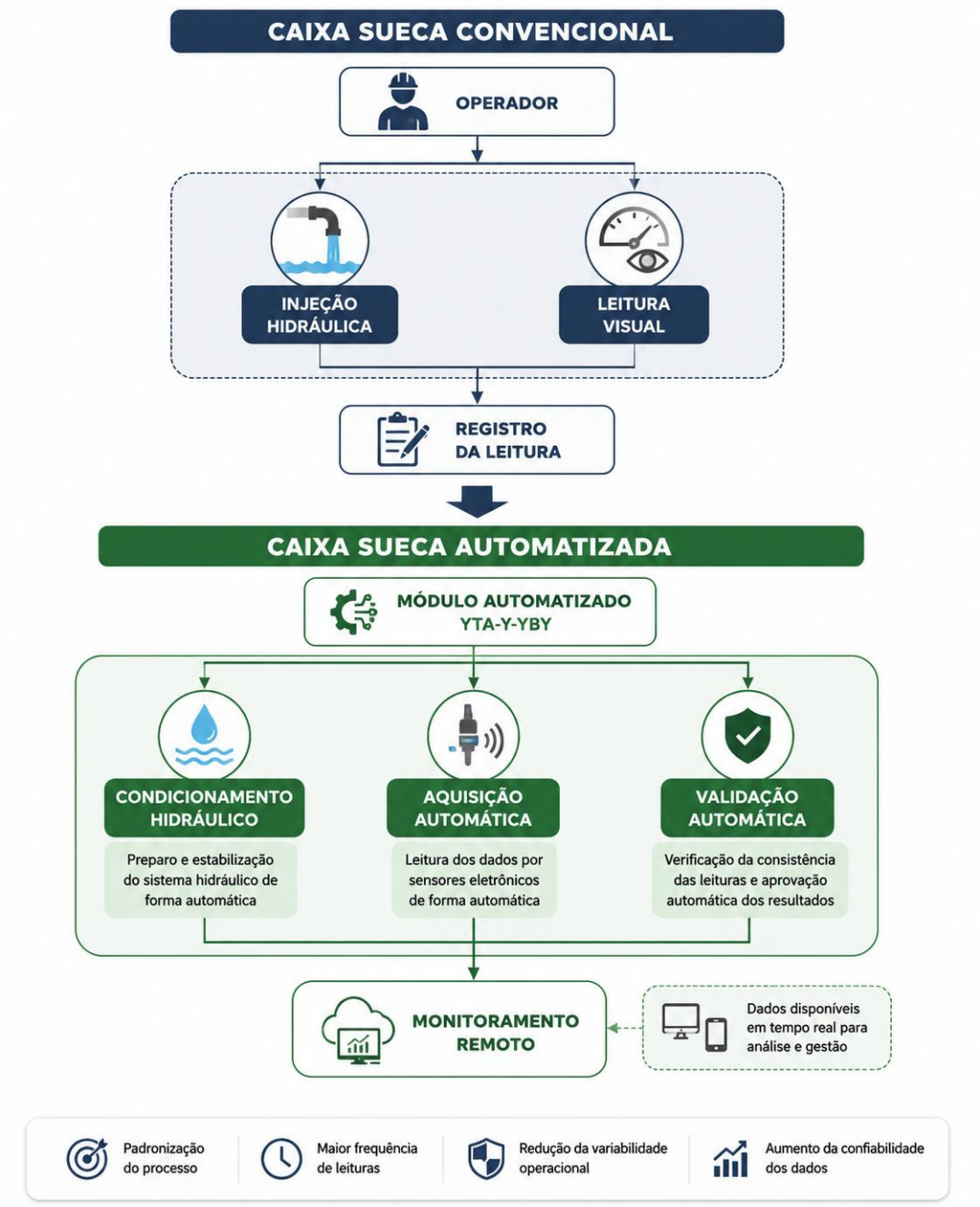


Figura 7: Comparação conceitual entre o procedimento manual tradicional e a metodologia de automação proposta para medidores hidrostáticos de recalque.

Durante a fase de implantação foram identificadas algumas limitações hidráulicas do sistema original que comprometiam a estabilidade das leituras automáticas. Ensaios experimentais demonstraram que determinadas características construtivas favoreciam oscilações transitórias da coluna d'água após o processo de condicionamento hidráulico, dificultando a obtenção de leituras repetitivas em intervalos reduzidos de tempo. A partir dessas observações foram desenvolvidas adaptações específicas no circuito hidráulico, preservando o funcionamento original do instrumento, porém reduzindo significativamente a amplitude dessas oscilações e aumentando a estabilidade das leituras.

Outro aspecto importante identificado durante o desenvolvimento foi a ausência de redundância hidráulica normalmente encontrada em configurações convencionais de caixas suecas. Como os instrumentos existentes utilizavam apenas uma linha hidráulica, tornou-se necessário desenvolver uma estratégia alternativa para validação automática das medições, baseada em critérios internos de consistência e repetibilidade das leituras, substituindo a tradicional comparação entre duas colunas d'água utilizada nas campanhas manuais.

Também foram realizados estudos experimentais para definição das condições mais adequadas de operação do sistema automatizado. Diferentes horários de aquisição foram avaliados ao longo de vários dias, permitindo identificar períodos de menor variabilidade natural das leituras e estabelecer uma rotina operacional capaz de minimizar interferências ambientais e aumentar a repetibilidade dos resultados. Da mesma forma, os parâmetros hidráulicos envolvidos no processo de condicionamento do sistema foram definidos experimentalmente para cada instalação, considerando as características particulares de cada instrumento.

A metodologia desenvolvida estabelece que cada ciclo automático de monitoramento seja composto pelas etapas de condicionamento hidráulico (injeção de água), estabilização do sistema, aquisição das leituras e validação automática da consistência dos resultados. Somente após a verificação do atendimento aos critérios internos de confiabilidade a leitura é incorporada ao banco de dados e disponibilizada para o sistema de monitoramento remoto. Caso as condições de estabilidade não sejam atingidas, o próprio sistema executa automaticamente novos ciclos de condicionamento e aquisição antes de validar o resultado final.

A solução foi concebida para operar de forma autônoma, utilizando alimentação elétrica permanente associada a sistema de respaldo para interrupções momentâneas de energia, relativamente frequentes no empreendimento monitorado. Da mesma forma, o sistema incorpora reservatórios individuais de água deaerada, dimensionados para garantir longos períodos de operação contínua entre as intervenções de manutenção preventiva.

Durante a operação do sistema também foram identificadas oportunidades de aprimoramento, principalmente relacionadas ao monitoramento das condições auxiliares de funcionamento, como interrupções prolongadas do fornecimento de energia elétrica e acompanhamento do nível do reservatório de água utilizada no condicionamento hidráulico. Embora tais aspectos não tenham comprometido a viabilidade da solução desenvolvida, sua incorporação representa importante evolução para futuras aplicações da metodologia.

Os resultados obtidos demonstraram que a automação baseada no condicionamento hidráulico do sistema proporcionou significativa melhoria na estabilidade e repetibilidade das leituras quando comparada ao procedimento manual anteriormente utilizado. Além da ampliação da frequência de aquisição dos dados, observou-se redução das oscilações normalmente associadas ao processo de leitura, maior padronização operacional e preservação das condições hidráulicas do instrumento ao longo do tempo, contribuindo para manutenção da confiabilidade do monitoramento.

Dessa forma, verificou-se que a principal contribuição da metodologia proposta não reside apenas na automatização da aquisição das leituras, mas na automação do

próprio processo hidráulico responsável pela qualidade da medição. Essa abordagem permite preservar os princípios originais de funcionamento das caixas suecas, reduzindo a influência da variabilidade operacional e ampliando significativamente seu potencial de aplicação em programas modernos de monitoramento geotécnico.

4.4 Benefícios Operacionais da Automação

A automação dos medidores hidrostáticos de recalque apresenta diversas vantagens operacionais quando corretamente concebida e implantada.

Entre os principais benefícios observados destacam-se:

- aumento da frequência de aquisição de dados;
- redução da dependência de campanhas manuais;
- eliminação de erros de transcrição;
- padronização do procedimento hidráulico;
- maior rastreabilidade das leituras;
- redução da subjetividade operacional;
- identificação precoce de anomalias;
- integração com sistemas de alerta e monitoramento remoto.

A aquisição contínua de dados também permite análises temporais mais detalhadas, possibilitando identificação de eventos transitórios e maior sensibilidade na detecção de variações de comportamento estrutural.

Outro aspecto relevante refere-se à própria conservação do sistema hidráulico. Diferentemente dos sistemas exclusivamente manuais, nos quais as mangueiras podem permanecer longos períodos sem circulação hidráulica, os sistemas automatizados promovem renovação periódica do fluido, contribuindo para redução do acúmulo de bolhas de ar, sedimentos e microrganismos.

Dessa forma, além de ampliar a frequência e a qualidade das leituras, a automação pode contribuir diretamente para o aumento da estabilidade operacional e da vida útil dos instrumentos.

Outro benefício relevante da automação hidráulica refere-se ao controle contínuo das perdas graduais de fluido provocadas por evaporação, micro vazamentos e aprisionamento de ar. Em sistemas sem manutenção periódica, essas perdas podem provocar desvios acumulados da ordem de centímetros, comprometendo significativamente a confiabilidade das leituras. Já os sistemas automatizados com recirculação e reposição periódica do fluido permitem manter maior estabilidade hidráulica, garantindo precisão operacional compatível com a tolerância típica de ±5 mm adotada para validação das leituras.

4.5 Considerações sobre Confiabilidade e Manutenção

Apesar das vantagens associadas à automação, os resultados observados demonstram que sistemas automatizados também exigem manutenção periódica e acompanhamento técnico especializado.

Sensores eletrônicos, *dataloggers*, válvulas, conexões hidráulicas e sistemas de transmissão estão sujeitos a falhas operacionais, interferências elétricas e degradação ao longo do tempo, exigindo inspeções preventivas e procedimentos periódicos de validação.

Além disso, recomenda-se que sistemas automatizados mantenham possibilidade de conferência manual das leituras, permitindo validação independentemente dos resultados eletrônicos e maior robustez ao processo de monitoramento.

Os resultados obtidos indicam que a automação das caixas suecas representa solução tecnicamente viável e operacionalmente vantajosa, desde que concebida não apenas como substituição da leitura visual por sensores eletrônicos, mas como automação integral do processo hidráulico de leitura e estabilização do sistema.

5. CONCLUSÕES

Os medidores hidrostáticos de recalque, popularmente conhecidos no Brasil como caixas suecas, representam uma das técnicas mais tradicionais para monitoramento de deslocamentos verticais em barragens de terra e enrocamento. Apesar da redução gradual de sua utilização nas últimas décadas, em função do surgimento de novas tecnologias de instrumentação geotécnica, os resultados apresentados neste trabalho demonstram que estes instrumentos permanecem tecnicamente competitivos, especialmente em barragens de enrocamento submetidas a grandes magnitudes de recalque e condições construtivas severas.

As avaliações realizadas em diferentes empreendimentos evidenciaram forte correlação entre a frequência de manutenção preventiva e a confiabilidade operacional dos medidores hidrostáticos. Em sistemas submetidos a manutenção hidráulica contínua, verificou-se elevada estabilidade das leituras ao longo de décadas de operação, inclusive em instrumentos instalados há mais de 40 anos. Em contrapartida, empreendimentos sem manutenção periódica apresentaram maior incidência de leituras erráticas, associadas principalmente à presença de bolhas de ar, degradação das mangueiras, biofilmes, obstruções e falhas de estanqueidade.

Os resultados também demonstraram que grande parte das anomalias observadas possui origem predominantemente hidráulica e operacional, sendo frequentemente reversível por meio de manutenção corretiva adequada. Procedimentos de substituição das mangueiras, circulação de água deaerada, estabilização hidráulica e padronização das leituras permitiram recuperar operacionalmente parcela significativa dos instrumentos inicialmente considerados não confiáveis. Por outro lado, os casos

efetivamente irreversíveis estiveram associados a falhas estruturais da tubulação enterrada ou da própria célula instalada no interior do maciço.

No contexto da automação, verificou-se que a simples substituição da leitura manual por sensores eletrônicos não é suficiente para garantir confiabilidade operacional de longo prazo. A automação eficiente das caixas suecas depende da reprodução controlada do processo hidráulico tradicional, incluindo preenchimento periódico, recirculação do fluido, eliminação de bolhas de ar e estabilização automática das colunas d'água.

Dessa forma, conclui-se que as caixas suecas permanecem como instrumentos robustos, confiáveis e compatíveis com aplicações em barragens de grande porte, desde que submetidas a manutenção preventiva adequada e procedimentos operacionais padronizados. Além disso, a automação destes sistemas apresenta elevado potencial para ampliação da frequência de monitoramento, redução das incertezas operacionais e preservação das condições hidráulicas internas, contribuindo para aumento da confiabilidade e da vida útil operacional dos instrumentos.

6. PALAVRAS-CHAVE

Português

- Caixa Sueca
- Medidor Hidrostático de Recalque
- Instrumentação de Barragens
- Monitoramento Geotécnico
- Automação
- Manutenção Preventiva

English

- Swedish Settlement Gauge
- Hydrostatic Settlement Gauge
- Dam Instrumentation
- Geotechnical Monitoring
- Automation
- Preventive Maintenance

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Basset, R. *A Guide to Field Instrumentation in Geotechnics: principles, installation and reading.* New York : Routledge, 2012.

2. Cruz, P. T. *100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto.* São Paulo : Oficina de Textos, 1996.

3. Dunnicliff, J. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance.* New York : John Wiley & Sons, 1988.

4. Massarsch, K. R. and Fellenius, B. H. Early Swedish Contributions to Geotechnical Engineering. *ASCE GeoInstitute Geo-Congress , Full-scale Testing in Foundation Design, State of the Art and Practice in Geotechnical Eng.* Oakland March 25-29, 2012.

5. Flodin, N. & Broms, B. B. *A History of Civil Engineering in Soft Clay. In: BRAND, E. W.; BRENNER, R. P. (Eds.). Soft Clay Engineering. .* Amsterdam : Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 1-27, 1981.

6. Silveira, João Francisco Alves. *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento.* São Paulo : Oficina de Textos, 2006.

7. Hanna, T. H. *Field Instrumentation in Geotechnical Engineering.* s.l. : Trans Tech Publications, 1985.

8. Terzaghi, Karl. Settlement of structures in Europe and methods of observation. *American Society of Civil Engineers.* 1938, Vols. 29 - pp.163-210.

9. Irwin, M. J. A mercury-filled gauge for mensurement of settlements of foundations. *Civil Engneering and public Works Review.* 1964; pp. 358-360.

10. Muller, G., Voort, H., Wohnlich, M. Recent development in slop monitoring equipment. *Proceedings, International Symposium on Field Mesurements in Rock Mechanics, Zurich.* 1977, Vols. 2, pp.757-773.

11. Engineering, Ground. Monitoring settlements in acessible areas. Edição nº 4, 1983, Vols. 16, pp. 41-42.

12. Bozozuk, M. A Fluid Settlement Gauge – Research Note. *Canadian Geotechnical Journal.* 6 (3), pp. 362–364., 1969.

13. Bozozuk, M. & Fellenius, B. H. The Bellow Hose Settlement Gauge. *Canadian Geotechnical Journal.* 16, pp. 233–235, 1979.

14. Dunnicliff, C. J. Instrumentation of the Plover Cove main dam. *Geotechnique.* 1968, Vols. 18, nº 3, pp.283-300.

15. Dunnicliff, C. J. Equipmento for field deformation mensurements. *Preoceedings 4th Pa American Confference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.* Puerto Rico, 1971, Vols. 2, pp. 319-332.

16. ICOLD - International Commission on Large Dams. General considerations applicable to instrumentation for earth and rockfill dams. *Buletin 21.* 1969.

17. —. Dam monitoring - General considerations. *Bulletim 60.* 1988.

18. Engineers, USACE - Department of the Army U.S. Army Corps of. *Intrumentation of Embankment Dams and Levees.* s.l. : Engineer Manual 1110-2-1908, 1995.

19. ICOLD - International Commission on Large Dams. Automated Dam Monitoring Systems - Guidelines and case histories. 2000.

	**Vinicius WEDEKIN** Engenheiro geotécnico, especialista em automação de instrumentos para monitoramento geotécnico e estrutural. Atua na concepção de projeto, implantação e coordenação técnica de instrumentação e monitoramento geotécnico de barragens, encostas, taludes e túneis. Possui experiência em análise probabilística para quantificação de risco, monitoramento ambiental, projetos de infraestrutura urbana e fechamento de minas.
	**Bárbara CHIODETO** Engenheira civil, Mestre em Ciências pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, especialista em Desastres Naturais. Possui experiência em Engenharia Geo-Ambiental, incluindo revitalização de brownfields, fechamento de mina e reconversão de uso do solo. Possui experiência em análise probabilística para quantificação de risco.
	**Tsuyoshi MIURA** Engenheiro civil com mais de 45 anos de experiência em instrumentação e monitoramento geotécnico, ensaios de campo e desenvolvimento e adequação de instrumentos e procedimentos de controle. Atuou como especialista em monitoramento geotécnico em obras metroviárias, ferroviárias, túneis e de barragens de mineração, reservação de água e geração de energia.

BRAZILIAN COMMITTEE ON DAMS
VI SYMPOSIUM ON INSTRUMENTATION OF DAMS AND GEOTECHNICAL STRUCTURES
THEME IN.4
BELÉM, PA, BRAZIL – SEPTEMBER 24, 2026

DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS TO IMPROVE PREDICTIVE MAINTENANCE OF DAMS

RAVET, Fabien
Physicist, PhD - Gradesens

VUARNOZ, Gaël
Engineer, BSc - Gradesens

PEDROSA, Paula
Engineer, MSc – 3Geo

RAPOSO, Rodrigo
Engineer, DSc – 3Geo

JACQUAT, Yvan
Engineer, MSc, Gradesens

ABSTRACT

The safety of dams depends on the effective interpretation of geotechnical instrumentation data to identify early signs of instability. This paper presents a hybrid framework combining digital twin modeling with traditional geotechnical analysis, focusing on the interpretation of Factor of Safety (FS). The methodology integrates long-term monitoring data, including reservoir level, flow rate, and piezometric measurements, into a physics-informed digital twin model. Results demonstrate anomaly detection and early identification of potential instability zones. The integration of digital twin outputs with FS qualitative interpretation enables the translation of data-driven anomalies into meaningful indicators of stability degradation, supporting decision-making in dam safety management.

RESUMO

A segurança das barragens depende da interpretação eficaz dos dados da instrumentação geotécnica para identificar sinais precoces de instabilidade. Este artigo apresenta uma estrutura híbrida que combina a modelagem de gêmeo digital com a análise geotécnica tradicional, com foco na interpretação do Fator de Segurança (FS). A metodologia integra dados de monitoramento de longo prazo, incluindo nível do reservatório, vazão e medições piezométricas, em um modelo de gêmeo digital baseado em física. Os resultados demonstram a detecção de anomalias e a identificação precoce de zonas de instabilidade em potencial. A integração dos resultados do gêmeo digital com a interpretação qualitativa do FS permite transformar anomalias baseadas em dados em indicadores significativos de degradação da estabilidade, apoiando a tomada de decisões na gestão da segurança de barragens.

1 INTRODUCTION

Dam failures represent one of the most critical risks in geotechnical engineering, with severe environmental, social, and economic consequences. As a result, modern dams are equipped with increasingly sophisticated instrumentation systems designed to monitor internal and external conditions [1].

However, the presence of instrumentation does not guarantee effective safety management. In practice, engineers face several challenges:

- Data are often manually collected and sparsely sampled
- Measurements from different instruments are not temporally synchronized
- The relationship between monitored variables and stability conditions is indirect and complex

Consequently, the interpretation of monitoring data remains largely dependent on expert judgment, with limited use of predictive tools.

Advance data processing such correlation techniques can improve the interpretation and enhance the response capability [2]. In industrial machinery, Digital twin technology has proven to be an efficient approach in preventing failures by detecting early signs of a degradation ([3], [4]). offers a promising solution by enabling the creation of predictive models based on historical data. These models can identify deviations from expected behavior and provide early warning of potential failure mechanisms. Nevertheless, current digital twin applications in dam engineering are often disconnected from traditional stability analysis frameworks, particularly the Factor of Safety (FS).

This article addresses this gap by proposing a hybrid framework that combines:

- Physics and Data-driven digital twin modeling
- Physics-based geotechnical interpretation
- Qualitative linkage to FS evolution

The work discusses first the importance of instrumentation for dam safety and what the limitations are in early detection of failure. It then introduces the concept of data and physics driven digital twins in the case of industrial machines. The concept is then adapted to the monitoring of dam stability and applied to a reservoir. Data from 2008 are fed into the modelling. The results are interpreted in terms of dams physical behavior, engineering requirements and practical implications.

2 INSTRUMENTATION AND DAM BEHAVIOR

2.1 Role of Instrumentation

Geotechnical instrumentation provides indirect insight into the internal behavior of dams which are of importance to improve dam safety ([1], [5], [6]). The most relevant measurements include reservoir water level (RL), which is a measure of hydraulic loading, pore pressure (PZ) measured with piezometers, and drainage flow, or flow rate (FR), which is an indication of seepage conditions and is measured with flow meter. An earth dam schematic with the instrumentation implementation is presented in Figure 1.

These variables are strongly coupled ([5], [6], [7], [8]). For example:

- An increase in reservoir level leads to increased hydraulic head

- This induces higher pore pressure within the dam body
- Changes in pore pressure influence drainage flow and effective stress

Importantly, these relationships are nonlinear and time-dependent, reflecting the complexity of seepage and consolidation processes.

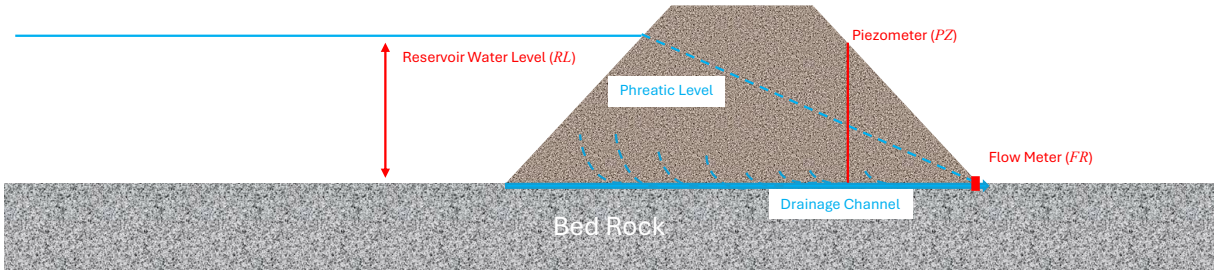


Figure 1 – **Earth Dam schematic with relevant measurement parameters.**

2.2 Factor of Safety and Stability Mechanisms

The Factor of Safety (FS) is defined as the ratio between resisting and driving forces acting on a potential failure surface and is widely used as a primary indicator of slope stability ([6], [9]).

From a geotechnical perspective, pore pressure plays a central role in stability through its influence on effective stress. In fact, an increase in pore pressure implies a reduction of effective stress. When the effective stress reduces, the shear strength decreases, which consequently lowers the FS.

A key observation in dam behavior is that FS degradation is often non-linear. It is commonly observed that early changes in hydraulic conditions may have limited impact, while, once a critical threshold is reached, rapid failure may occur. This delayed response highlights the importance of detecting early precursors rather than relying solely on FS thresholds. The use of data analytics and digital twin-based methodology can enhance the early detection of possible failure.

3 DIGITAL TWIN METHODOLOGY

3.1 Digital Twin Concept

In classic Condition Monitoring System (CMS), thresholds are set on fixed values of the condition parameter [10]. An alarm is triggered as soon as the condition parameter crosses the threshold (Figure 2). The approach is completely distinct in predictive maintenance ([3], [4]). First, condition parameters and production data are gathered to build a predictive model. A prediction area is required and is defined based on the tolerance estimated during the learning period. The predicted condition parameter can then be compared with the measured parameter through a normalized anomaly parameter. The whole process is schematically presented in Figure 3. The indication of the health state of the supervised machine depends on how measured and predicted parameters behave relatively one to the other to appreciate operation's stability. The machine is considered to be healthy when the measured parameter remains in the boundaries of the prediction area. Should the measured parameter deviate and exceeds the tolerances, a flag or alarm can be raised informing the operator that an anomaly in the machine behavior has been detected. Such approach pinpoints a machine degradation earlier than conventional CMS based on threshold crossing (Figure 2).

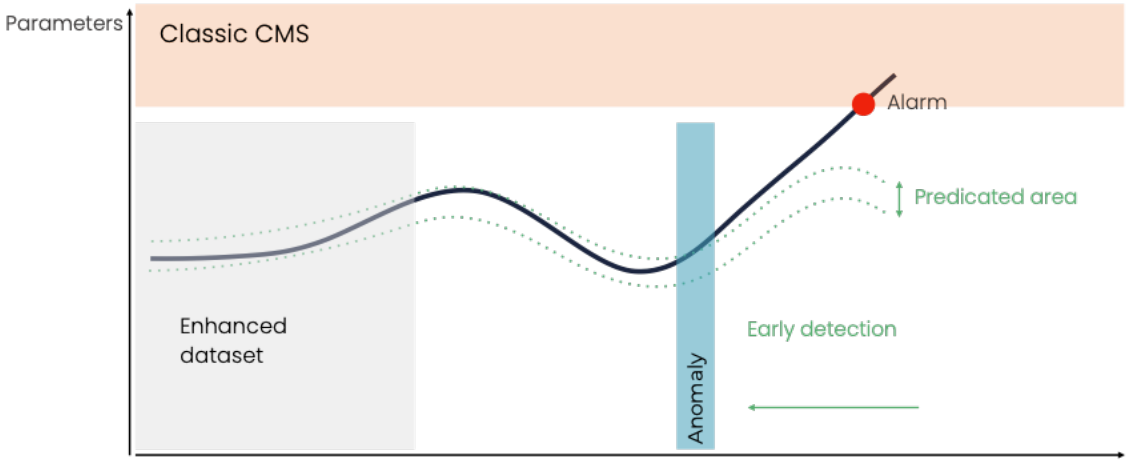


Figure 2 – **Classic CMS and digital twin approach comparison. The schematic illustrates the use of a multi-parameter digital twin, defining a prediction area (bounded by the dash lines) to monitor the health state of a machine and anormal behavior. The measured parameter (continuous bold line) should remain within the prediction area.**

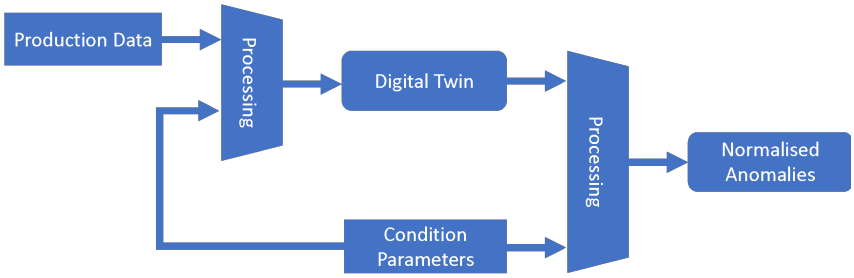


Figure 3 – **Monitoring data analysis process flow.**

Data form the Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) are provided through Modbus communication protocol or after synchronization of the MoonStone database (Gradesens proprietary database) with an external database. The data collected is used to build a multi-parameter Digital Twin (DT) of the condition parameters using Machine Learning (ML) algorithms. A time sliding learning period is defined to compute the digital twin of the condition parameters of the machine. The duration of the learning period depends on the complexity of the modelling. The number of parameters, the environmental conditions and the machine dynamics are the constraints that determine the learning period. The environmental effects and the parameter quantity tend to increase the duration while the machine dynamics would reduce it.

The Key Performance Indicator (KPI) is the deviation between the condition parameter prediction and its measurement. More rigorously, it is defined as the relative deviation of the daily or weekly average value of the condition parameter measurement and its prediction. Whenever the measured condition parameter average value lies within the prediction area, the deviation value remains in the [-1,1] interval, implying that the machine does not misbehave. The normalized anomaly concept is presented schematically in Figure 4.

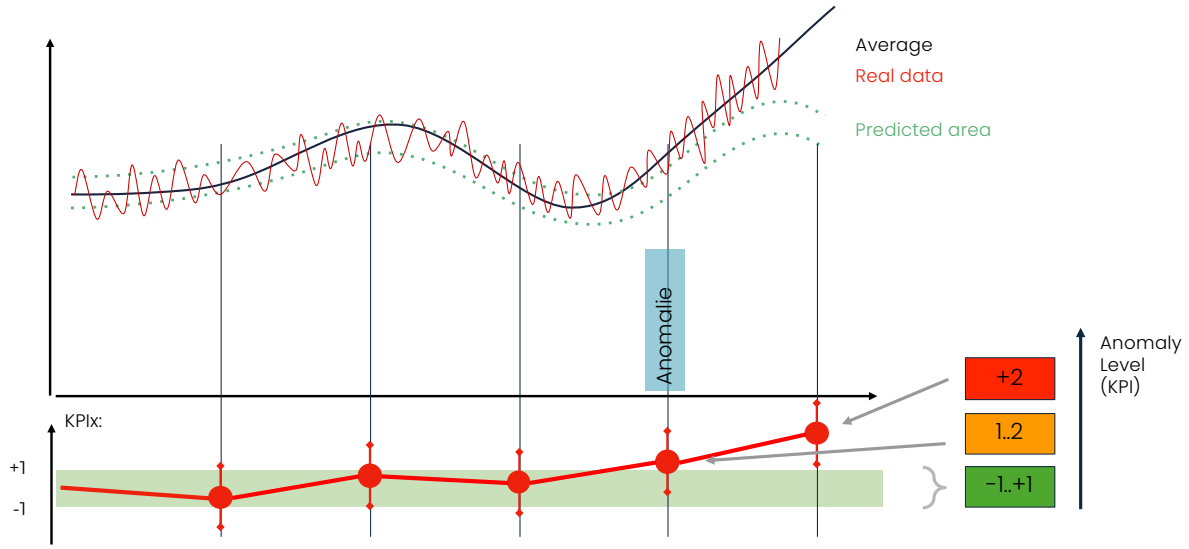


Figure 4 – **KPI as the metric of the deviation between the condition parameter prediction and its actual measurement. The green band presents the prediction area.**

3.2 Class of algorithms

The prediction relies on the availability of three main classes of algorithms: Linear or Augmented Regression (LAR); Ensemble Boost Regression (EBR); Neural Network Regression (NNR). The use of one or the other depends on a trade-off between performance and ease of training. The trade-off is driven by the computing complexity, the modelling capability, the stability and the data availability. Relative performance is summarized in Table 1. Our experience has demonstrated that most of the time, simple models give best scores because we are modelling physical processes ([3], [4]).

Table 1 - Relative model performances

Model	Computing complexity	Modelling capability	Stability	Training with limited data
LAR	Low	Low	High	Low
EBR	Average	Average	Average	Average
NNR	High	High	Low	High

3.3 Golden rules for robust predictions

In predictive maintenance, historical data is often limited in both quantity and quality, and not all modes of operation are necessarily represented. This means that special attention must be given to how models are designed and implemented. Wherever possible, the model structure should be grounded in the physics of the machine. Using multiple sub-models, each with a small number of independent parameters, allows for faster training and reduces the need for large datasets. The choice of training window should match the dynamics of the potential failure being monitored.

It is also important to incorporate different classes of algorithms and to design the model so it can combine results from multiple predictions. Simple, generalizable models—such as linear models—are often preferable, even if they have some residual error. However, in cases where certain parameters are missing, slightly more complex models with minor overfitting can be useful, as they can detect both maintenance

needs and operational changes. Above all, attention should be placed on the trends in predictions—focusing on relative variations rather than absolute values.

4 CASE STUDY

4.1 Digital Twin Application to Dam Monitoring

The digital twin approach developed in this study is a predictive model based on approach discussed in section 3. Its objective in the current case is to replicate the relationship between hydraulic inputs such as the reservoir level and the horizontal drainage flow with the dam internal responses (pore pressure, or PZ). The predicted pore pressure ($PZ_{predicted}$) evolution as a function of time (t) is modeled as:

$$PZ_{predicted}(t) = f\big(RL(t), FR(t)\big) \quad (1)$$

Where $RL(t)$ is the reservoir level and $FR(t)$ is the flow rate. f defines the relationship between PZ and the input parameters RL and FR, and is driven by the algorithm selected and the training period.

The deviation between the predicted value $PZ_{predicted}$ and the measured value $PZ_{measured}$ is defined as the residual or prediction error ε,

$$\varepsilon(t) = PZ_{measured} - PZ_{predicted} \quad (2)$$

It determines the predicted area, or, in other word, the tolerance of the prediction, and depends on the same factors as f. The anomaly detection relies on the normalized anomaly NA(t), which is defined as

$$NA(t) = \varepsilon(t)/\sigma(t) \quad (3)$$

Where σ(t) is the error standard deviation computed over the training period. The normalized anomaly is then the prediction error normalized relative to the prediction error from the training period.

The LAR algorithm is implemented in the current project. Its main advantage lies in its simplicity which matches the physical relation between PZ, RL and FR. It is also compatible with a long training period, where the physical processes are slow. The used methodology emphasizes the interpretability of the prediction, the robustness under limited data conditions and the relevance to physical processes

4.2 Data Description

The modelling is applied to a section of a reservoir dam for which historical data is available from 2008 to 2024. The data dam section was monitored between 2008 and 2024. Instrumentation layout is displayed in Figure 5. The dataset includes reservoir level measurements (RL), flow data from drainage systems (FR) and piezometric readings from two locations ($PZ\text{-}20$ and $PZ\text{-}21$). Instrumentation readings for the complete period is presented in Figure 6 and Figure 7.

A key characteristic of the dataset is its low temporal resolution as only monthly and manual readings are collected. In addition, data are unsynchronized due to the mode of collection.

The modelling aims at predicting the behavior of piezometer $PZ\text{-}20$, located in a region sensitive to hydraulic variations, and piezometer $PZ\text{-}21$, located in a more stable zone. This configuration allows the comparison of spatial variability in dam behavior.

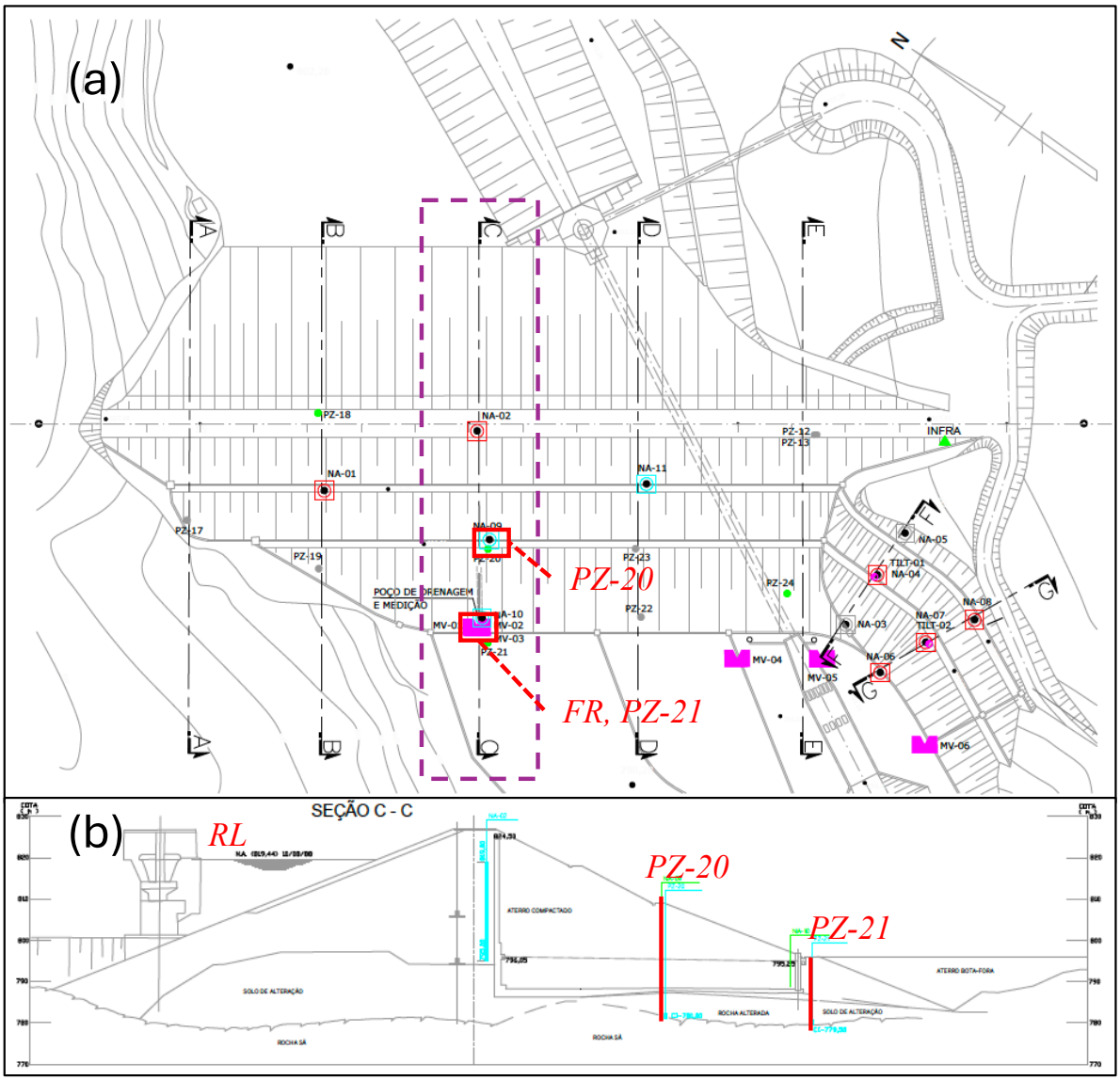


Figure 5 – **Instrumentation lay-out: (a) dam top view; (b) dam section of interest.**

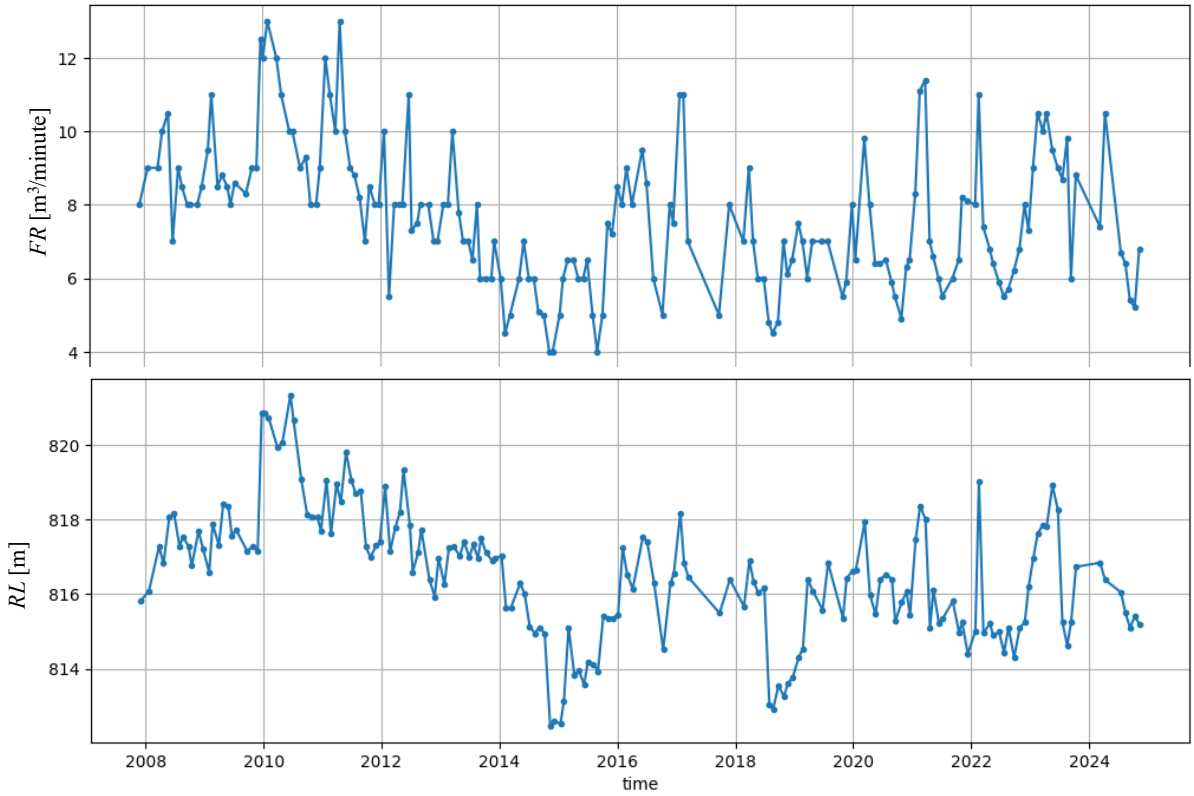


Figure 6 – **Flow rate and reservoir level measurements (model input data).**

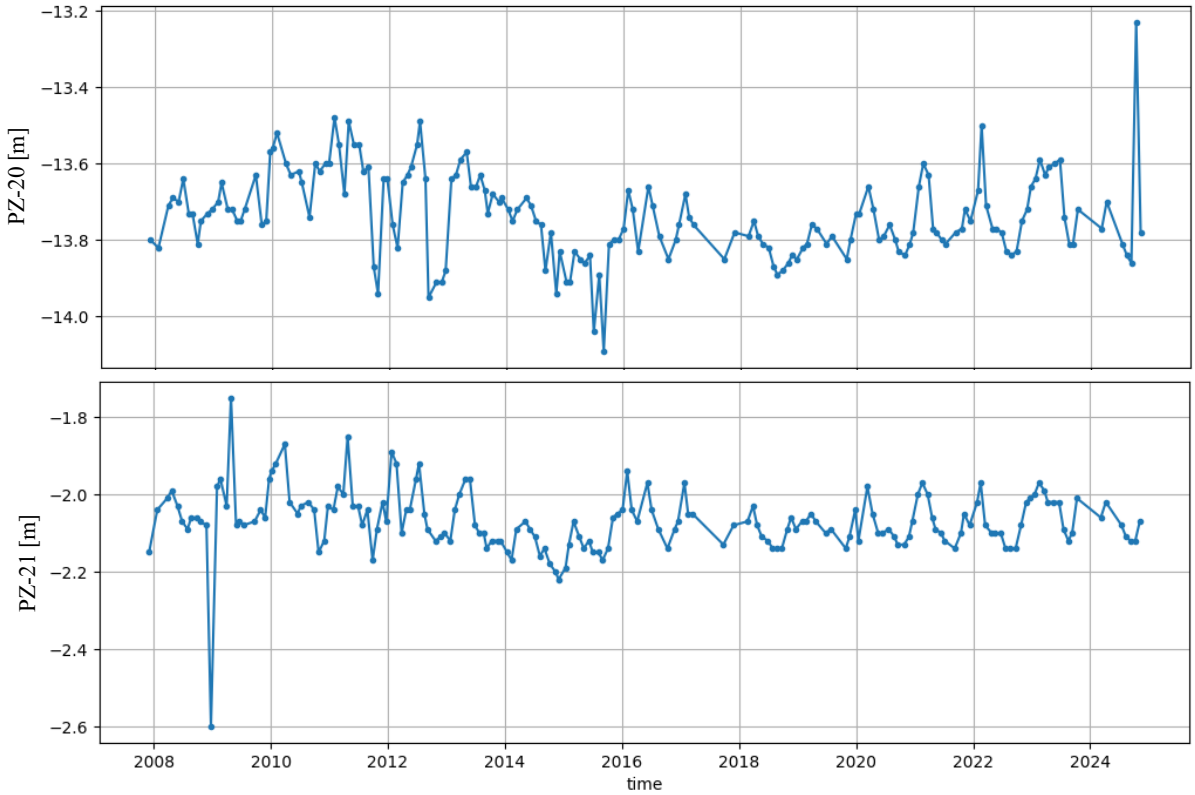


Figure 7 – **Measurements from piezometers 20 and 21 (data to be predicted).**

5 RESULTS

Figure 8 and Figure 9 present the digital twins of *PZ-20* and *PZ-21* respectively. The observation of these curves reveals significant deviations in *PZ-20* after 2021 and stable behavior in *PZ-21*. Additionally, the modelling captures a trend associated with a known historical hydraulic event, the so-called water crisis which occurred between 2014 and 2016, validating its sensitivity to system changes. This last event is well described by *PZ-20* but its appearance is shallower on *PZ-21*.

The observed anomalies in PZ-20 suggest localized increase in saturation, possible reduction in drainage efficiency, potential development of critical hydraulic conditions. The absence of similar behavior in PZ-21 highlights the importance of spatially distributed instrumentation.

The digital twin demonstrates strong predictive capability, successfully capturing the general evolution of pore pressure despite the listed data limitations. Prediction areas provide a reliable representation of expected system behavior, enabling clear identification of deviations.

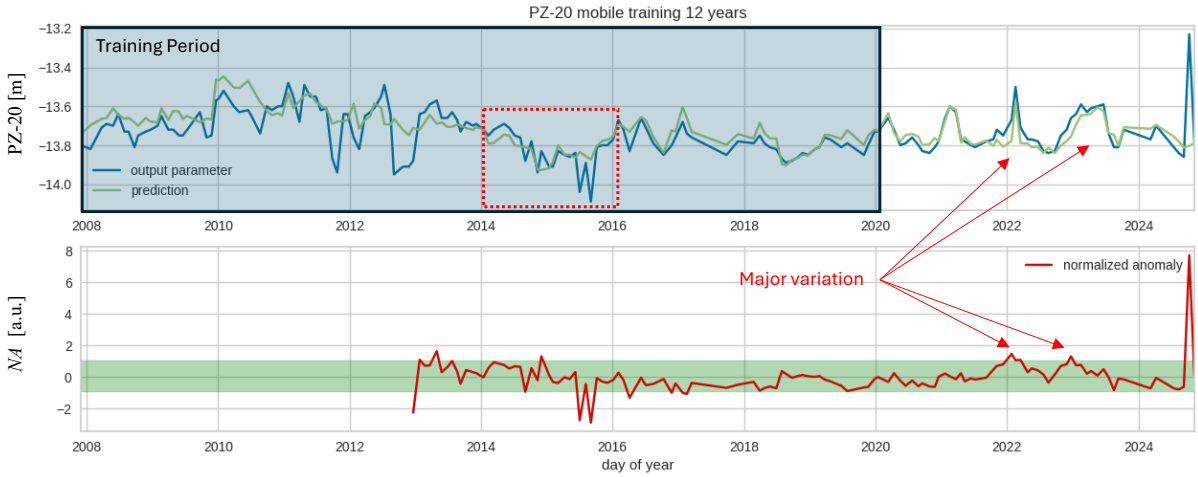


Figure 8 – **Comparison between prediction and measurements of piezometer *PZ-20*. The green band in the *NA* graph defines the prediction area.**

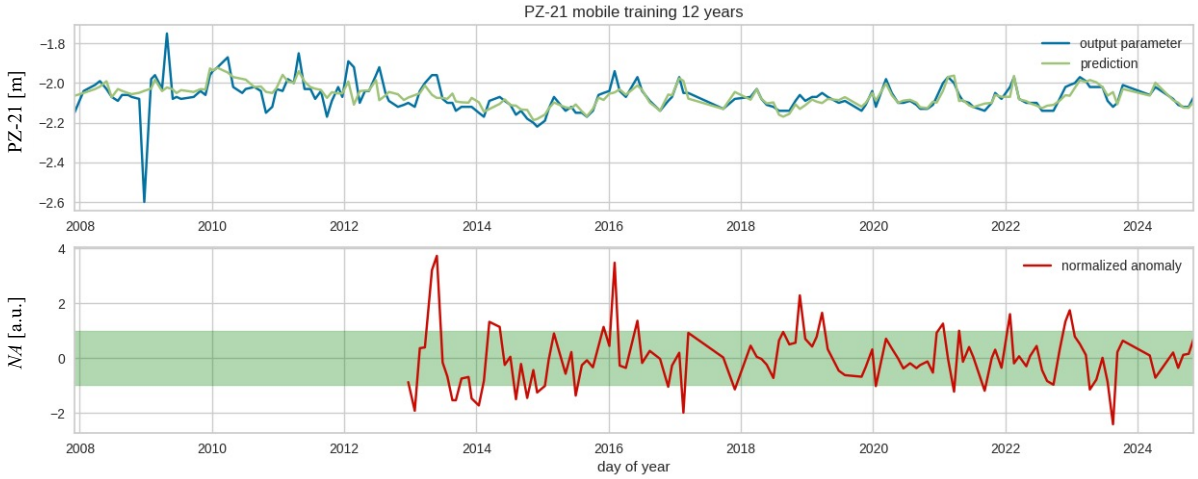


Figure 9 – **Comparison between prediction and measurements of piezometer *PZ-21*. The green band in the *NA* graph defines the prediction area.**

6 INTEGRATION WITH FACTOR OF SAFETY

The key contribution of this work is the qualitative linkage between digital twin anomaly detection and geotechnical stability indicators. An increase in anomaly level corresponds to increased pore pressure, reduced effective stress and decreasing FS.

From an engineering Interpretation perspective, the following outcomes can be drawn. First, a stable behavior indicates that the FS remains within safe range. Then, the apparition of drifting trends can be interpreted as a gradual FS reduction. Finally, persistent anomalies can be viewed as a potential approach to critical conditions. As a whole, these interpretations can be understood as a framework that allows engineers to understand data-driven results in a physically meaningful way.

The proposed and tested methodology has practical implications. First, it sparks an early warning before critical FS values are reached. It also improves the prioritization of inspections. At last, but not least, it provides an enhanced understanding of internal dam processes

7 CONCLUSIONS

This article presents a hybrid methodology integrating digital twin modeling with geotechnical analysis for dam safety assessment. The results demonstrate that digital twins can effectively detect anomalies in instrumentation data and that these anomalies can be directly linked to physical processes affecting structural stability. Furthermore, the integration of digital twin outputs with FS qualitative interpretation provides a powerful decision-support tool for engineers. The proposed approach is particularly valuable in contexts where data are sparse or manually collected, and where traditional analysis methods are difficult to apply continuously. Future developments will focus on the integration of real-time monitoring systems, the coupling of digital twin models with numerical stability analyses, and the automated estimation of FS based on data-driven indicators.

8 KEYWORDS

Digital Twin, Dam Safety, Instrumentation, Piezometers, Factor of Safety, Predictive Maintenance

9 REFERENCES

[1] Adamo N. et al, “Dam Safety: Monitoring of Tailings Dams and Safety Reviews”, Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, Vol.11, No.1, 2020, 249-289, https://doi.org/10.47260/jesge/1117

[2] Hamze-Guilart M. et al, “Analyzing the effect of drainage on the stability of tailings dams using the interpretation of cross-correlations”, Sensors, 25(6), 1833. https://doi.org/10.3390/s25061833

[3] Ravet F. et al, “Wireless Sensor Network Powered with Data Analytics for Small Hydro Reliability Enhancement”, 2023 IEEE SENSORS, Vienna, Austria, 2023, pp. 1-4. https://10.1109/SENSORS56945.2023.10325097

[4] Jacquat Y. et al, “Implementation of a predictive maintenance solution on a 60 MW Pump Storage System based on Machine Learning Computed Digital Twins”, 2025 Hydro Power and Dams, Thessaloniki, Greece.

[5] Seyed-Kolbadi S.M. et al, “Instrumented Health Monitoring of an Earth Dam” *Infrastructures* 2020, *5*, 26. https://doi.org/10.3390/infrastructures5030026

[6] Raposo R., “Instrumentação de barragens e inspeções visuais”, internal communication, 2025
[7] Sibanda J., et al. (2024), “Numerical and physical modelling of pore pressure relief drains in embankments”, Proceedings of the 5th ECPMG 2024, 5th European Conference on Physical Modelling in Geotechnics, 2024, Dlft, The Netherlands.
[8] Clarkson L. et al, “An Overview of Conventional Tailings Dam Geotechnical Failure Mechanisms”, Mining, Metallurgy & Exploration 38, 1305–1328 (2021). https://doi.org/10.1007/s42461-021-00381-3
[9] Terzaghi K. et al, “Mechanics in Engineering Practice”, 3rd Edition, Wiley. (1996)
[10] García Márquez F.P. et al, “Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods”, Renewable Energy, Volume 46, 2012, Pages 169-178, https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.003.

	**RAVET, Fabien** Fabien is COO of Gradesens, a company that offers end-to-end solution for predictive maintenance. Since 1994, Fabien has contributed to the development of sensing technologies based on optical fibres and their enhancement with data analytics methods. Fabien holds a PhD in Science (Physics) from the University of Ottawa, Canada, and is a Senior Member of the IEEE.
	**VUARNOZ, Gaël** Gaël is a Project Engineer at Gradesens, a company providing AI-driven predictive maintenance. After completing his bachelor thesis with the firm, he joined in 2024 while pursuing a Master's in Mechanical Engineering at HES-SO. He manages projects from field installation to data engineering, specializing in deploying ML algorithms and analytics pipelines for Industry 4.0.
	**PEDROSA, Paula** Civil Engineer with an M.Sc. in Geotechnical Engineering from Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro and a Ph.D. candidate at University of Brasília. As Engineering Manager at 3Geo, she specializes in geotechnical monitoring, DFOS technologies, and risk management for mining structures.
	**RAPOSO, Rodrigo** Civil Engineer graduated from Fluminense Federal University, with a D.Sc. from UFF and professor since 1994. He is CEO of 3Geo and a geotechnical consultant specializing in dams, instrumentation, and fiber optic monitoring systems, with international experience across Latin America and Africa.
	**JACQUAT, Yvan** Yvan is CEO and co-founder of Gradesens, a company that offers end-to-end solution for predictive maintenance for the Industry 4.0. He holds a degree of Dipl. Ing. from ETHZ, Zurich, Switzerland, with executive MBA and has more than 20 years of experience in industrial maintenance, Condition Monitoring and predictive analytics.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I ENCONTRO SOBRE MODERNIZAÇÃO, REPOTENCIAÇÃO E REVERSIBILIDADE DE USINAS
TEMA MR.4
BELÉM – PA, 21 DE SETEMBRO DE 2026

DIGITAL TWIN APLICADO AO MONITORAMENTO E MANUTENÇÃO DE ESTRUTURAS CIVIS: INTEGRAÇÃO DE DADOS E GESTÃO DE ATIVOS NA UHE BELO MONTE

Bruno dos Santos da SILVA
Engenheiro Civil - Norte Energia S.A.

Bruno MARTINI
Diretor de Produtos e Tecnologia - SYSDAM

Laís Fernanda Tabosa ARAÚJO
Engenheira Civil - Norte Energia S.A.

Vinicius Otavio de Souza de AZEVEDO
Técnico de Segurança de Barragens - Norte Energia S.A.

Wallace Lucas ALMEIDA
Piloto de Aeronave Não Tripulada - PCP Engenharia

RESUMO

A gestão de ativos em empreendimentos hidrelétricos de grande porte exige a integração contínua de dados provenientes de instrumentação geotécnica, inspeções de campo, levantamentos topográficos, registros de manutenção e sistemas corporativos. Em ativos distribuídos por extensas áreas e submetidos a diferentes regimes operacionais, a fragmentação dessas informações pode dificultar a correlação entre o comportamento estrutural observado, o histórico de intervenções e o planejamento de ações preventivas. Com o objetivo de ampliar a rastreabilidade e a capacidade analítica sobre o comportamento das estruturas civis, vem sendo estruturado na UHE Belo Monte um ambiente digital georreferenciado baseado nos princípios de Digital Twin. A iniciativa integra modelos tridimensionais das estruturas, nuvens de pontos obtidas por levantamentos com drones, dados de instrumentação e registros históricos de manutenção em uma base única de representação virtual dos ativos, permitindo o acompanhamento espacial e temporal das condições estruturais e das intervenções realizadas. A convergência entre modelagem 3D, georreferenciamento e bases de dados técnicas estabelece uma camada adicional de inteligência operacional, possibilitando a correlação entre indicadores de monitoramento, ocorrências de campo e atividades de manutenção. Essa abordagem favorece a identificação precoce de comportamentos atípicos, a priorização de inspeções e intervenções e o aprimoramento do planejamento de manutenção preventiva. Este trabalho apresenta o projeto piloto de aplicação do modelo Digital Twin na UHE Belo Monte para centralização e organização das informações técnicas, ampliando a rastreabilidade das manutenções e fortalecendo a tomada de decisão baseada em dados integrados e como ferramenta de suporte à gestão de segurança de barragens.

ABSTRACT

Asset management in large-scale hydroelectric projects requires the continuous integration of data from geotechnical instrumentation, field inspections, topographic surveys, maintenance records, and corporate systems. In assets distributed over extensive areas and subjected to different operational regimes, the fragmentation of this information can hinder the correlation between observed structural behavior, intervention history, and the planning of preventive actions.
With the aim of improving traceability and analytical capacity regarding the behavior of civil structures, a georeferenced digital environment based on Digital Twin principles is being structured at the Belo Monte Hydroelectric Power Plant. The initiative integrates three-dimensional models of the structures, point clouds obtained from drone surveys, instrumentation data, and historical maintenance records into a single virtual representation database of the assets, enabling spatial and temporal monitoring of structural conditions and completed interventions.
The convergence of 3D modeling, georeferencing, and technical databases establishes an additional layer of operational intelligence, enabling the correlation between monitoring indicators, field occurrences, and maintenance activities. This approach supports the early identification of atypical behaviors, the prioritization of inspections and interventions, and the improvement of preventive maintenance planning.
This paper presents the pilot project for applying the Digital Twin model at the Belo Monte Hydroelectric Power Plant, aimed at centralizing and organizing technical information, increasing maintenance traceability, and strengthening data-driven decision-making as a support tool for dam safety management.

1. INTRODUÇÃO

A gestão da segurança de diques e barragens em empreendimentos hidrelétricos de grande porte envolve desafios diretamente associados à complexidade estrutural, à extensão territorial dos ativos e ao elevado volume de dados gerados pelas atividades de monitoramento, inspeção e manutenção. No caso da UHE Belo Monte, essa complexidade é evidenciada por um sistema composto por 36 diques e barragens, monitorados por aproximadamente 2.640 instrumentos geotécnicos, distribuídos ao longo de uma extensa área. Esse cenário impõe à gestão a necessidade de lidar com um volume expressivo de dados provenientes de diferentes fontes, cuja adequada consolidação, rastreabilidade e interpretação são fundamentais para a avaliação do comportamento das estruturas e para o planejamento das ações de segurança e manutenção.

Antes da digitalização dos processos, a gestão das informações de monitoramento e inspeção demandava elevado esforço de organização e análise pelas equipes técnicas. Com a implantação do SYSDAM, a partir de 2020, observou-se um avanço relevante na digitalização da gestão da segurança de diques e barragens. O sistema permitiu a centralização dos dados de instrumentação, a padronização das leituras e a

organização das séries históricas em uma base estruturada, reduzindo significativamente a dependência de controles paralelos e de atividades manuais de consolidação de dados. Esse avanço representou um marco importante na evolução da gestão, não apenas pela organização das informações, mas principalmente pelo ganho de eficiência na atuação das equipes técnicas.

As inspeções de segurança de diques e barragens seguiam rotinas estabelecidas, sendo formalizadas por meio de relatórios técnicos contendo descrições das condições observadas, registros fotográficos e identificação de anomalias. Entretanto, a correlação entre os dados de instrumentação, os registros de inspeção e as atividades de manutenção dependia, em grande medida, de análises manuais e da experiência dos profissionais envolvidos. Sob a perspectiva da segurança de barragens, esse modelo implicava maior dependência da interpretação individual e maior esforço para obtenção de uma visão integrada do comportamento das estruturas. O tempo necessário para organização e análise das informações impactava diretamente a agilidade das avaliações técnicas, reduzindo a capacidade de resposta frente a possíveis desvios de comportamento, aspecto crítico na gestão do risco.

Diante desse contexto, a aplicação de tecnologias digitais voltadas à integração de dados, georreferenciamento, modelagem tridimensional e gestão de ativos apresenta-se como uma alternativa relevante para aprimorar o acompanhamento das condições das estruturas civis. Nesse sentido, o conceito de Digital Twin surge como uma abordagem capaz de consolidar informações de monitoramento, inspeção e manutenção em uma representação digital integrada, favorecendo a rastreabilidade, a análise técnica e a tomada de decisão baseada em dados.

Este trabalho apresenta a estruturação de um projeto piloto de aplicação do conceito de Digital Twin na UHE Belo Monte, tendo como foco a integração de dados de monitoramento geotécnico, inspeções de campo, levantamentos topográficos e registros de manutenção, no contexto da gestão de segurança de barragens.

2. GESTÃO INTEGRADA DE MONITORAMENTO E MANUTENÇÃO NA UHE BELO MONTE

No contexto da UHE Belo Monte, a gestão da segurança de barragens envolve o acompanhamento contínuo de estruturas civis distribuídas em uma ampla área do empreendimento, submetidas a diferentes condições operacionais, ambientais e de conservação. A adequada avaliação dessas estruturas depende da integração entre dados de instrumentação geotécnica, registros de inspeção, ocorrências observadas em campo e histórico das intervenções de manutenção, de modo a permitir uma leitura mais completa do comportamento e das condições dos ativos.

Antes da digitalização dos processos, a gestão das informações de monitoramento e inspeção demandava elevado esforço de organização e análise pelas equipes técnicas. Com a implantação do SYSDAM, a partir de 2020, observou-se um avanço relevante na digitalização da gestão da segurança de diques e barragens. O sistema permitiu a centralização dos dados de instrumentação, a padronização das leituras e a organização das séries históricas em uma base estruturada, reduzindo significativamente a dependência de controles paralelos e de atividades manuais de consolidação de dados.



Figura 1 – Visualização georreferenciada de estrutura civil no ambiente digital.

Esse avanço representou um marco importante na evolução da gestão, não apenas pela organização das informações, mas principalmente pelo ganho de eficiência na atuação das equipes técnicas. A redução do tempo anteriormente dedicado ao preenchimento, tratamento e consolidação de dados possibilitou que os profissionais passassem a direcionar maior esforço para a análise técnica do comportamento das estruturas, aumentando a capacidade de interpretação dos dados e o suporte à tomada de decisão.

Nesse novo cenário, as análises tornaram-se mais ágeis e confiáveis, uma vez que passaram a ser baseadas em informações estruturadas e facilmente acessíveis. Como resultado, houve melhoria na priorização das demandas técnicas, permitindo respostas mais rápidas frente às condições observadas em campo e maior assertividade na gestão da segurança dos diques e barragens.

Dessa forma, a implantação do SYSDAM representou não apenas a digitalização dos processos, mas uma mudança no foco da atuação técnica, com a transição de um modelo centrado na consolidação de dados para um modelo orientado à análise e à tomada de decisão.

2.1. GESTÃO DA MANUTENÇÃO DAS ESTRUTURAS

No que se refere à manutenção, as atividades são executadas de forma contínua, com foco na conservação das estruturas e na preservação de suas condições operacionais. Essas rotinas compreendem, principalmente, serviços como roçagem, limpeza fina, tratamento da proteção vegetal dos taludes, incluindo replantio, calagem e adubação, os quais são essenciais para o controle das condições superficiais dos maciços.

A adequada execução dessas atividades contribui diretamente para a manutenção da estabilidade e do desempenho das estruturas, ao permitir o controle da vegetação, a proteção dos taludes contra processos erosivos e a garantia de condições adequadas para as inspeções visuais. Em sistemas extensos como o da UHE Belo Monte, essas

atividades demandam planejamento contínuo e acompanhamento sistemático, em função da grande área a ser atendida e da variabilidade das condições ao longo dos diques e barragens.

Nesse contexto, a gestão da manutenção ultrapassa o caráter operacional e passa a exigir organização estruturada das informações, de forma a possibilitar o acompanhamento das rotinas executadas e subsidiar a priorização das atividades em função das condições observadas em campo.

No entanto, enquanto os dados de monitoramento passaram a ser tratados de forma mais estruturada, as informações relacionadas às atividades de manutenção ainda permanecem, em grande parte, fora desse ambiente, especialmente no que se refere ao planejamento, execução e controle das rotinas operacionais.

Apesar dos avanços obtidos com a digitalização dos dados de monitoramento, observa-se que a gestão da manutenção ainda não se encontra plenamente integrada a esse ambiente, o que limita o potencial de utilização das informações de forma sistêmica e orientada à tomada de decisão.

Essa lacuna dificulta a correlação direta entre o comportamento observado pelas leituras de instrumentação, as condições verificadas nas inspeções e as intervenções de manutenção realizadas nas estruturas, reforçando a necessidade de uma abordagem integrada entre monitoramento, inspeção e manutenção.

2.2. OPORTUNIDADE DE EVOLUÇÃO POR MEIO DO DIGITAL TWIN

Nesse contexto, observa-se uma oportunidade de evolução da gestão, com a incorporação da manutenção ao ambiente digital, de forma a alinhar as atividades rotineiras de conservação das estruturas às informações provenientes do monitoramento e das inspeções de campo. Essa evolução busca complementar a base técnica já consolidada no SYSDAM, integrando o histórico de comportamento estrutural a uma camada de visualização espacial. Como forma de avançar nesse processo, propõe-se a aplicação do conceito de Digital Twin, por meio de um estudo de caso na Barragem de Fechamento Esquerda - BFE, com o objetivo de integrar, em um ambiente digital georreferenciado, os dados de monitoramento, as informações de inspeção e os registros associados às atividades de manutenção.

Além da integração dos dados de monitoramento e inspeção, a utilização de levantamentos realizados por drones, com geração de nuvens de pontos, ortomosaicos e modelos digitais da superfície, amplia a capacidade de análise das condições físicas das estruturas. Essas informações permitem identificar, com maior precisão espacial, indícios de falhas na cobertura vegetal, taludes expostos, processos erosivos, áreas com necessidade de replantio, trechos com deficiência de proteção superficial e regiões que demandam ações complementares de manutenção.

Dessa forma, o Digital Twin passa a atuar também como ferramenta de apoio ao planejamento da manutenção preventiva, possibilitando que as intervenções sejam direcionadas de forma mais assertiva. A identificação prévia das áreas críticas contribui para reduzir deslocamentos desnecessários, otimizar o uso de equipes, racionalizar a aplicação de insumos, como corretivos, adubos e fertilizantes, e priorizar ações voltadas à preservação da integridade superficial dos maciços.

A adoção dessa abordagem tem potencial para proporcionar ganhos significativos na gestão, destacando-se a melhoria da rastreabilidade das atividades realizadas nas estruturas, permitindo maior controle e transparência das ações executadas. Adicionalmente, possibilita um planejamento mais assertivo das atividades de manutenção, com base na priorização orientada por dados técnicos, incluindo a definição de intervenções quando necessárias.

Outro benefício relevante refere-se à eficiência na aplicação dos recursos, uma vez que a integração das informações permite direcionar esforços de forma mais estratégica, reduzindo dispersão de atividades e otimizando o uso de equipes e insumos. Além disso, o Digital Twin contribui para uma visão sistêmica das condições dos diques e barragens, ampliando a capacidade de análise e suporte à tomada de decisão.

Dessa forma, a evolução da gestão da segurança de diques e barragens na UHE Belo Monte pode ser compreendida como uma transição de um modelo intensivo em controles manuais e planilhas para uma abordagem progressivamente orientada por dados, na qual a integração entre monitoramento e manutenção, por meio do Digital Twin, representa um avanço relevante na busca por maior eficiência, rastreabilidade e confiabilidade na gestão das estruturas.

3. METODOLOGIA

3.1. ESTRUTURA PILOTO: BARRAGEM DE FECHAMENTO ESQUERDA — BFE

Para fins de desenvolvimento e validação inicial da solução, foi selecionada como estrutura piloto a Barragem de Fechamento Esquerda — BFE, pertencente ao sistema de barramentos da UHE Belo Monte.

A Barragem de Fechamento Esquerda apresenta crista na elevação EL. 100,00 m, extensão aproximada de 1.085 m, altura máxima da ordem de 88,00 m e largura de crista de 7,00 m. A estrutura é composta por solo compactado e enrocamento, com núcleo argiloso, configurando uma barragem de relevância significativa para a gestão da segurança do empreendimento.

Em função de suas dimensões, características construtivas e importância para o sistema de barramentos da UHE Belo Monte, a BFE constitui um caso adequado para avaliação da integração entre dados de monitoramento geotécnico, inspeções de campo, registros de manutenção, levantamentos topográficos e representação tridimensional georreferenciada.

A aplicação do Digital Twin nessa estrutura permite avaliar a viabilidade de centralização das informações técnicas em uma representação virtual dos ativos, favorecendo a rastreabilidade das condições observadas, das intervenções executadas e da evolução temporal do comportamento da barragem.

3.2. FONTES DE DADOS CONSIDERADAS NO AMBIENTE DIGITAL

A estruturação do ambiente Digital Twin considera a integração de diferentes fontes de dados técnicos, contemplando informações provenientes de instrumentação geotécnica, inspeções de segurança, registros fotográficos, levantamentos topográficos, levantamentos aerofotogramétricos por drones, nuvens de pontos, ortomosaicos, modelos tridimensionais, registros de manutenção e sistemas

corporativos de apoio à gestão. Nesse cenário, o SYSDAM atua como o repositório central de dados de instrumentação e inspeções, fornecendo os insumos necessários para que a representação digital reflita com precisão o comportamento histórico e atual da estrutura.

Os levantamentos por drones e as nuvens de pontos assumem papel relevante nesse processo, pois permitem a representação espacial detalhada da superfície das estruturas. A partir dessas informações, torna-se possível apoiar a identificação de alterações na cobertura vegetal, exposição de taludes, processos erosivos superficiais, necessidade de replantio e áreas com demanda de aplicação de insumos voltados à recuperação ou manutenção da proteção vegetal.

Essas informações, quando tratadas de forma isolada, podem limitar a compreensão integrada do comportamento da estrutura. Entretanto, quando consolidadas em um ambiente digital único e georreferenciado, permitem estabelecer correlações espaciais e temporais entre o comportamento observado, as condições identificadas em campo e as intervenções realizadas.

Categoria	Fonte de dados	Aplicação no ambiente Digital Twin/Nexus
Monitoramento	SYSDAM	Leituras de instrumentação geotécnica, séries históricas e indicadores de comportamento.
Inspeção	SYSDAM inspeção	Registros de inspeções, anomalias, fotografias e localização das ocorrências.
Ensaios de campo	SYSDATA	Resultados de ensaios de caracterização e controle tecnológico.
Documentação	Gestão de documentos	Projetos, desenhos as built, relatórios técnicos e especificações de engenharia.
Levantamentos	Drones, ortomosaicos e nuvens de pontos	Visualização espacial, análise de taludes, cristas e condições superficiais.
Manutenção	Ordens de serviço	Registros de intervenções preventivas e corretivas vinculadas ao ativo.
Geoespacial	GIS, modelos 3D e 3D tiles	Base cartográfica e tridimensional para navegação e correlação espacial dos dados.

Tabela 1 – Fontes de dados consideradas no ambiente Digital Twin

3.3. ESTRUTURAÇÃO DO MODELO DIGITAL TWIN

O modelo Digital Twin proposto para a BFE parte da criação de uma representação digital georreferenciada da estrutura, associada a bases de dados técnicas relacionadas ao monitoramento, inspeção e manutenção. Essa representação permite que informações antes distribuídas em diferentes sistemas, planilhas e relatórios sejam organizadas em uma mesma lógica espacial, facilitando a visualização, consulta e análise integrada.



Figura 3 – Representação tridimensional georreferenciada da estrutura piloto.

A estruturação do modelo considera a vinculação dos dados técnicos ao ativo físico correspondente, permitindo que instrumentos geotécnicos, registros de inspeção, ocorrências de campo e atividades de manutenção sejam associados a pontos, trechos ou áreas específicas da barragem.

No contexto da manutenção das estruturas, a nuvem de pontos e os produtos derivados dos levantamentos por drones permitem que a superfície da barragem seja analisada de forma mais detalhada, possibilitando a identificação de áreas com deficiência de cobertura vegetal, pontos de erosão, trechos de talude exposto e locais com necessidade de recomposição ou tratamento superficial.

Essas informações podem ser associadas ao modelo digital da estrutura, permitindo que cada ocorrência identificada seja vinculada à sua localização, registro fotográfico, data de levantamento, tipo de intervenção necessária e histórico de manutenção realizado. Com isso, o planejamento das equipes de campo passa a ser orientado por informações espaciais mais precisas, reduzindo a dependência exclusiva de inspeções pontuais e aumentando a eficiência das ações preventivas.

Além disso, a utilização do modelo digital pode auxiliar na definição mais precisa das áreas que demandam replantio, aplicação de corretivos, adubação ou fertilização, contribuindo para a melhor estimativa de quantitativos, redução de desperdícios e aplicação mais racional dos recursos disponíveis.

Dessa forma, o Digital Twin passa a funcionar como uma camada adicional de inteligência operacional, permitindo acompanhar a evolução temporal das condições da estrutura e apoiar a priorização de ações preventivas ou corretivas com base em dados integrados.



Figura 2 – Fluxo conceitual de integração dos dados no ambiente Digital Twin

Dado de campo → Validação técnica → Base digital → Georreferenciamento → Modelo 3D → Análise integrada → Priorização da manutenção → Registro histórico.

3.4. INTEGRAÇÃO ENTRE MONITORAMENTO, INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO

A integração entre monitoramento, inspeção e manutenção constitui o principal diferencial da abordagem proposta. No modelo tradicional, essas informações tendem a ser avaliadas em fluxos distintos, exigindo esforço adicional das equipes para correlacionar leituras de instrumentação, registros de anomalias e intervenções executadas.

No ambiente Digital Twin, essas informações passam a ser associadas à representação espacial da estrutura, permitindo que determinada leitura, ocorrência ou manutenção seja analisada em conjunto com sua localização física e seu histórico técnico. Essa integração contribui para ampliar a rastreabilidade das decisões e fortalecer o processo de gestão da segurança de barragens.



Figura 4 – Correlação entre registro georreferenciado e série histórica de monitoramento.

Como exemplo, uma anomalia observada durante inspeção de campo pode ser registrada em ambiente georreferenciado, vinculada a fotografias, associada a instrumentos próximos e relacionada ao histórico de manutenções realizadas naquele trecho. Essa lógica permite uma avaliação mais completa da condição da estrutura e favorece a definição de prioridades de intervenção.

Como aplicação prática, o levantamento por drone pode indicar determinado trecho da BFE com falha de cobertura vegetal ou início de processo erosivo superficial. Essa informação, ao ser incorporada ao ambiente Digital Twin, pode ser associada ao trecho georreferenciado da estrutura, permitindo verificar se existem instrumentos próximos, registros anteriores de inspeção, histórico de manutenção ou recorrência de intervenção naquela mesma área.

A partir dessa análise integrada, a equipe técnica pode definir se a ação mais adequada envolve apenas acompanhamento, replantio, correção do solo, aplicação de adubo ou fertilizante, recomposição superficial ou outra intervenção específica. Dessa forma, a tecnologia contribui para transformar o levantamento visual em uma informação técnica estruturada, rastreável e útil para a tomada de decisão.

4. RESULTADOS ESPERADOS

A aplicação do Digital Twin na Barragem de Fechamento Esquerda tem como principais resultados esperados o aumento da rastreabilidade das informações técnicas, a melhoria da integração entre monitoramento e manutenção, a redução de controles paralelos e o fortalecimento da tomada de decisão baseada em dados. A integração permitirá que as análises de tendência geradas pelo SYSDAM sejam visualizadas diretamente sobre o modelo 3D, facilitando a identificação de correlações entre variações de leituras instrumentais e anomalias físicas observadas em campo.

Sob a perspectiva da manutenção, espera-se que a utilização de nuvens de pontos, ortomosaicos e modelos digitais contribua para maior assertividade na identificação de

áreas que demandam intervenção. A possibilidade de visualizar espacialmente falhas de cobertura vegetal, taludes expostos, processos erosivos e áreas com necessidade de replantio permite planejar as frentes de manutenção com maior precisão.

Esse ganho tende a refletir diretamente na otimização dos recursos empregados, uma vez que as equipes podem ser direcionadas para áreas previamente identificadas como prioritárias, reduzindo deslocamentos improdutivos, retrabalho e aplicação desnecessária de insumos. Da mesma forma, a estimativa mais precisa das áreas a serem tratadas permite melhor planejamento da quantidade de materiais necessários, como mudas, sementes, corretivos, adubos e fertilizantes.

Além do ganho econômico, a abordagem contribui para a conservação da integridade das estruturas, uma vez que favorece a identificação precoce de condições superficiais que, se não tratadas, poderiam evoluir para processos erosivos mais relevantes ou comprometer as condições adequadas de inspeção visual.

Espera-se que a centralização das informações em um ambiente digital georreferenciado permita maior clareza sobre o histórico das intervenções realizadas, facilitando a identificação de áreas recorrentes, a priorização de inspeções e a definição de ações preventivas. Além disso, a representação tridimensional da estrutura tende a favorecer a comunicação entre as equipes técnicas, permitindo uma compreensão mais objetiva das condições observadas em campo.



Figura 5 – Delimitação de área para apoio ao planejamento da manutenção.

Outro resultado esperado consiste na melhoria do planejamento das atividades de manutenção, uma vez que a associação entre dados de comportamento estrutural, inspeções e histórico de intervenções permite direcionar recursos de forma mais eficiente, reduzindo retrabalho e aumentando a assertividade das ações executadas.

Aspecto avaliado	Modelo atual	Modelo proposto com Digital Twin/Nexus

Visualização	Relatórios, planilhas e registros isolados.	Ambiente digital integrado, georreferenciado e associado ao modelo 3D.
Manutenção	Planejamento reativo ou baseado em cronogramas fixos.	Planejamento apoiado em dados de inspeção, nuvens de pontos e histórico de intervenções.
Rastreabilidade	Correlação limitada entre ocorrência, inspeção e serviço executado.	Registro histórico vinculado à localização específica do ativo.
Priorização	Análises manuais e consolidação posterior das informações.	Priorização baseada na integração entre monitoramento, inspeção e manutenção.
Recursos	Estimativas gerais de áreas e insumos.	Apoio à estimativa de quantitativos e ao direcionamento de equipes e materiais.

Tabela 2 – Comparação entre o modelo atual e o modelo proposto com Digital Twin

5. CONCLUSÕES

A aplicação do conceito de Digital Twin à gestão de estruturas civis da UHE Belo Monte representa uma evolução relevante no processo de integração entre monitoramento geotécnico, inspeções de campo e manutenção de barragens.

A utilização da Barragem de Fechamento Esquerda como estrutura piloto permite avaliar, em escala aplicada, os benefícios da centralização de informações técnicas em um ambiente digital georreferenciado, favorecendo a rastreabilidade das intervenções, a visualização espacial das condições observadas e o acompanhamento temporal do comportamento da estrutura.

A incorporação de levantamentos por drones, nuvens de pontos e modelos digitais também amplia a capacidade de planejamento da manutenção, permitindo identificar previamente áreas com deficiência de cobertura vegetal, taludes expostos, processos erosivos e trechos com necessidade de recomposição superficial, replantio, adubação ou aplicação de fertilizantes.

Essa abordagem contribui para a otimização de tempo, recursos humanos e insumos, uma vez que permite direcionar as equipes e os materiais para áreas previamente mapeadas e tecnicamente priorizadas, reduzindo deslocamentos improdutivos, retrabalho e aplicação desnecessária de produtos.

Embora a gestão do monitoramento já tenha apresentado avanços significativos com a implantação de sistemas digitais estruturados, a integração das informações de manutenção ao mesmo ambiente representa uma oportunidade de ampliar a eficiência da gestão, reduzir controles paralelos e fortalecer a tomada de decisão baseada em dados.

Dessa forma, o Digital Twin apresenta-se como uma ferramenta de suporte à gestão da segurança de barragens, contribuindo para maior confiabilidade, transparência e assertividade no planejamento das ações de inspeção, monitoramento e manutenção. A continuidade do projeto piloto poderá subsidiar a expansão da metodologia para outras estruturas do empreendimento, consolidando uma abordagem progressivamente orientada por dados e integrada à gestão de ativos.

6. PALAVRAS-CHAVE

Digital Twin; segurança de barragens; monitoramento geotécnico; gestão de ativos; manutenção preventiva.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 set. 2010.

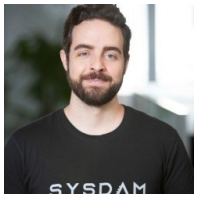
[2] BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1 out. 2020.

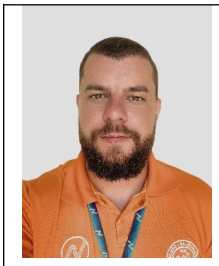
[3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº 1.064, de 2 de maio de 2023. Estabelece critérios e ações de segurança de barragens fiscalizadas pela ANEEL. Brasília: ANEEL, 2023.

[4] GRIEVES, M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. White paper, 2014.

[6] GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: KAHLEN, F.-J.; FLUMERFELT, S.; ALVES, A. (org.). Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches. Cham: Springer, 2017. p. 85–113.

[7] TAO, F.; QI, Q.; WANG, L.; NEE, A. Y. C. Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. Engineering, v. 5, n. 4, p. 653–661, 2019.

	**Bruno dos Santos da SILVA** Engenheiro Civil pela Anhanguera de Rondonópolis – MT. Cursa pós-graduações em Segurança de Barragens e Engenharia de Custos, Licitações e Contratos com Ênfase em BIM. Atua na Norte Energia como Engenheiro Sênior, com experiência em obras de infraestrutura.
	**Bruno MARTINI** Engenheiro Civil pela PUC Minas, mestre em Geotecnia pela UFOP, especialista em Data Science pela UC Berkeley College of Engineering e MBA em Liderança, Inovação e Gestão 4.0. Atua no SYSDAM como Diretor de Produtos e Tecnologia.
	**Laís Fernanda Tabosa ARAÚJO** Engenheira Civil pela Universidade da Amazônia. Especialista em Segurança de Barragens e em Engenharia de Segurança do Trabalho. MBA em Gestão de Projetos e Processos. Atua na Norte Energia como Engenheira de Segurança de Barragens Jr., na área de Registros e Controles.

	**Vinicius Otavio de Souza de AZEVEDO** Técnico em Mineração e graduado em Gestão de Recursos Humanos. Cursa pós-graduação em Segurança de Barragens. Atua na Norte Energia como Técnico de Segurança de Barragens Júnior.
	**Wallace Lucas ALMEIDA** Graduado em Análise e Desenvolvimento de Software e cursando Engenharia de Software e Sistemas de Informação. Atua pela PCP Engenharia na UHE Belo Monte como piloto de aeronave não tripulada, com experiência em aerolevantamentos, modelos digitais e modelagem 3D.

Brazilian Committee on Dams
VI Symposium on Instrumentation of Dams and Geotechnical Structures
Theme IN.4
Belém, PA, Brazil – September 24, 2026

IMPROVING MICROSEISMIC PHASE IDENTIFICATION AT THE SERRA DA MESA HYDROELECTRIC DAM (BRAZIL) USING A PARAMETER-FREE SYNCHROSQUEEZED WAVELET DENOISING APPROACH

HUAMANI HUAMANI, Ivan Fernando
UG in Geophysical Sciences - UNSA

CONDORI QUISPE, Cristobal
DSc in Geosciences - UNSA

RONDÁN SANABRIA, Edgar Rodolfo
DSc in Physics - GeoOndas Ltda

MOREIRA VILHENA, Ricardo
MSc in Geotechnics - AXIA Energia

YCHOCAN ACHACHUI, Dayann Kinberly

UG in Geophysical Sciences - UNSA

ABSTRACT

High signal-to-noise ratio (SNR) seismic records are essential for reliable identification of seismic phases (P and S waves) and accurate location of microseismic events associated with reservoir-induced seismicity (RIS), which reflects stress perturbations driven by hydraulic loading and constitutes a critical indicator for the geomechanical stability of large dams. However, continuous seismic monitoring is affected by environmental and anthropogenic noise, degrading phase picking and event detectability, particularly for low-magnitude signals. This study presents a parameter-free adaptive Denoising method based on the Synchrosqueezed Continuous Wavelet Transform (SS-CWT). The approach integrates automatic threshold estimation via Generalized Cross-Validation (GCV) with pixel-connectivity analysis in the time-frequency domain, enabling objective suppression of low-energy noise without manual tuning. Filtered signals are reconstructed through inverse SS-CWT. The methodology is applied to seismic data recorded at the Serra da Mesa Hydroelectric Dam (Goiás, Brazil), encompassing reservoir-induced, natural and mining-induced events, and is benchmarked against Butterworth band-pass filtering (3-30 Hz and 20-49 Hz). Results show enhanced SNR and improved clarity of seismic phase onsets, enabling robust microseismic event detection and location. Moreover, the denoised datasets provide higher-quality inputs for machine-learning-based processing, serving as a tool for microseismic monitoring and dam safety assessment.

RESUMO

Dados sísmicos com alta relação sinal-ruído (SNR) são essenciais para a identificação confiável das fases sísmicas (ondas P e S) e para a localização precisa de eventos microssísmicos associados à sismicidade induzida por reservatórios (RIS), a qual reflete perturbações no estado de esforços impulsionadas pelo carregamento hidráulico e constitui um indicador crítico da estabilidade geomecânica de grandes barragens. No entanto, o monitoramento sísmico contínuo é afetado por ruído ambiental e antropogênico, o que degrada o picado de fases e a detectabilidade de eventos, especialmente em sinais de baixa magnitude. Este estudo apresenta um método adaptativo de eliminação de ruído sem parâmetros (Denoising), baseado na Transformada Wavelet Contínua Synchrosqueezed (SS-CWT). A abordagem integra a estimação automática de limiares por meio da Validação Cruzada Generalizada (GCV) com uma análise de conectividade de pixels no domínio tempo-frequência, permitindo a supressão objetiva de ruído de baixa energia sem ajuste manual. Os sinais filtrados são reconstruídos por meio da transformada inversa SS-CWT. A metodologia é aplicada a dados sísmicos registrados na Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa (Goiás, Brasil), abrangendo eventos induzidos por reservatório, naturais e induzidos por mineração, sendo comparada com o filtro passa-banda de Butterworth (3-30 Hz e 20-49 Hz). Os resultados mostram um aumento significativo da SNR e uma melhor definição do início das fases sísmicas, permitindo uma detecção e localização mais robustas de eventos microssísmicos. Além disso, os dados tratados fornecem entradas de maior qualidade para processamento baseado em aprendizado de máquina, servindo como uma ferramenta para o monitoramento microssísmico e a avaliação da segurança de barragens.

1. INTRODUCTION

Reservoir-induced microseismicity constitutes a key indicator of stress-state variations associated with changes in hydraulic loading in large hydroelectric reservoirs [1]. Fluctuations in reservoir level modify pore pressure and effective stress within the crust, potentially reactivating pre-existing faults or generating new microfractures and low-magnitude seismic events [2,3]. Continuous seismic monitoring of dam environments has therefore become essential for understanding the geomechanical response of the surrounding geological-structural setting and for evaluating potential variations in slope and foundation stability [4].

In Brazil, several cases of reservoir-induced seismicity have been documented in association with hydroelectric projects. Among them, the Serra da Mesa Hydroelectric Dam (EHU-MS), located on the Tocantins River in the state of Goiás, represents a prominent example where seismic activity has been correlated with reservoir filling cycles and local geomechanical conditions [5]. This infrastructure is one of the largest hydroelectric facilities in the country and the reservoir has the greatest storage capacity in Brazil, playing a critical role in the national energy matrix. Given its strategic importance, investigating the relationship between reservoir operation and induced seismicity is crucial, particularly in a setting characterized by cyclic water-level fluctuations and regional tectonic stresses acting on pre-existing fault systems (Figure 1).

Reliable location of microseismic events depends fundamentally on the accurate identification of P- and S-wave arrivals. However, due to their low magnitude, these events typically exhibit low signal-to-noise ratios (SNR) and are frequently contaminated by environmental and anthropogenic noise. This limitation complicates the precise determination of phase arrival times, thereby increasing uncertainties in hypocentral location and in the subsequent geophysical interpretation.

Conventional signal processing strategies commonly rely on band-pass filtering, particularly Butterworth filters, to enhance data quality. Despite their widespread use, these approaches present important limitations: they require manual selection of cutoff frequencies and filter order, may introduce phase distortions, and often fail to ensure reliable phase polarity identification [6-8]. Time-frequency methods based on wavelet transforms have emerged as a more suitable alternative for the analysis of non-stationary seismic signals, offering improved localization of transient features associated with microseismic events [9]. In this context, the Synchrosqueezed Continuous Wavelet Transform (SS-CWT) provides a high-resolution time-frequency representation that enhances energy concentration and improves separation between seismic signals and background noise [10].

This study proposes a parameter-free denoising workflow based on the SS-CWT, hereafter referred to as the *Denoising* method. The approach integrates automatic threshold selection using Generalized Cross-Validation (GCV) with pixel-connectivity analysis in the time-frequency domain, enabling objective suppression of low-energy noise without manual parameter tuning. The methodology is applied primarily to reservoir-induced seismicity data recorded at the Serra da Mesa Hydroelectric Dam, as well as to anthropogenic seismic events generated by explosions and to local and regional natural earthquakes. The main objective is to improve seismic phase identification and, consequently, the accuracy of event location. Ultimately, the proposed approach aims to strengthen microseismic monitoring and dam safety

assessment while providing higher-quality datasets to enhance the performance of automated detection methods, including STA/LTA algorithms and neural network-based workflows.

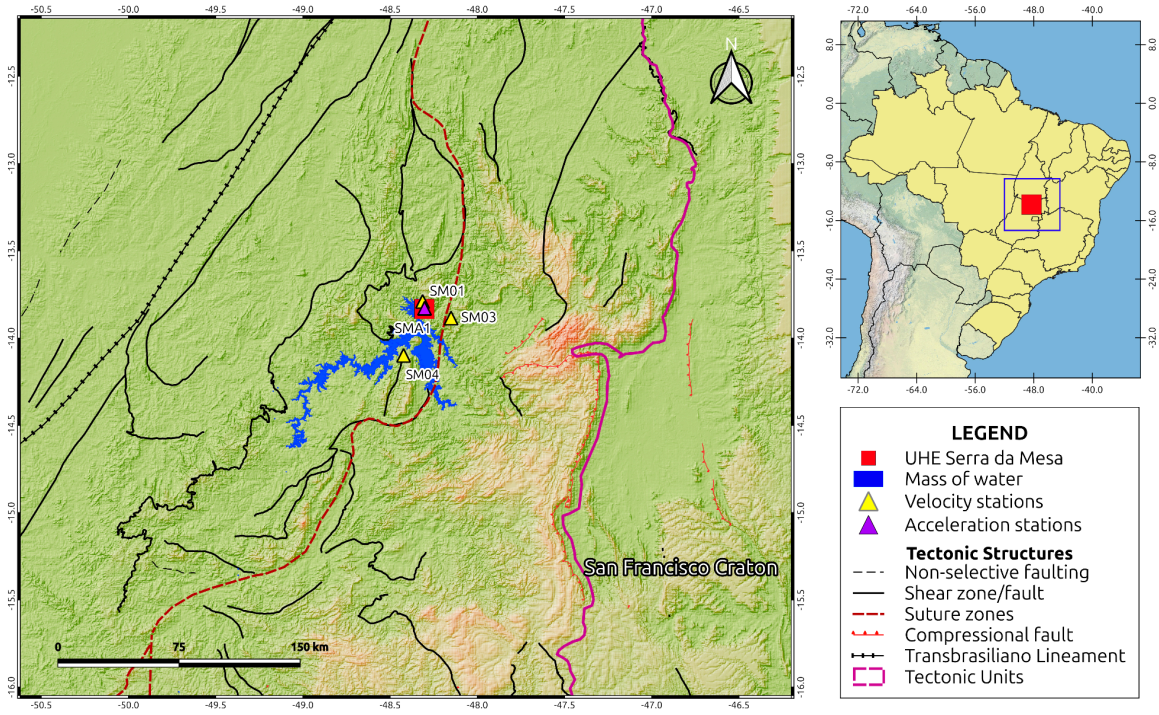


Figure 1 – Tectonic framework of the study area illustrating the location of the Serra da Mesa Hydroelectric Dam, the reservoir extent, and the distribution of velocity and accelerometric stations of the AXIA seismic network.

2. METHODOLOGY

2.1 Synchrosqueezed continuous wavelet transform

The Continuous Wavelet Transform (CWT) of a signal $s(t)$ is defined as a function dependent on the scale a and temporal shift τ [11, 12]:

$$W_s(a,\tau) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)\psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right)dt, \quad (1)$$

where ψ represents the mother wavelet and ψ^* its complex conjugate.

The instantaneous angular frequency of the signal can be estimated from the wavelet transform coefficients through the temporal derivative:

$$\omega_s(a,\tau) = \frac{-i}{W_s(a,\tau)} \frac{\partial W_s(a,\tau)}{\partial \tau}, \; W_s(a,\tau) \neq 0 \quad (2)$$

However, in the Continuous Wavelet Transform (CWT), the signal energy is typically spread over the time-scale plane (a, τ), which reduces resolution in the time-frequency domain, especially when the signal exhibits concentrated spectral content. To address this issue, the Synchrosqueezed Wavelet Transform (SS-CWT) redistributes the wavelet coefficients into the instantaneous frequency domain [13], yielding a more concentrated representation:

$$T_s(\omega,\tau) = (\Delta\omega)^{-1} \sum_{a_k:|(a_k,\tau)-\omega_l|\leq\frac{\Delta\omega}{2}} W_s(a_k,\tau) a_k^{-3/2} (\Delta a)_k \quad (3)$$

where $W_s(a_k,\tau)$ is the wavelet coefficient evaluated at the discrete scale a_k, ω_l is the instantaneous frequency estimated from the CWT, and $\Delta\omega$ is the frequency bin width.

The SS-CWT transforms the coefficients $W_s(a,\tau)$ into a more precise representation in the time-frequency plane $T_s(\omega,\tau)$ [14]. This procedure allows energy to be reassigned around the true frequencies of the signal, significantly improving time-frequency resolution. Moreover, the SS-CWT is a reversible transform, enabling reconstruction of the original signal from its coefficients:

$$s(t) \approx R\left[C_\psi^{-1} \sum_k T_s(\omega_k,t)(\Delta\omega)_k\right] \quad (4)$$

2.2 General cross-validation thresholding

Generalized Cross-Validation (GCV) is a statistical method used to automatically determine optimal smoothing parameters. This method serves as a technique that applies thresholding in the time-frequency domain in order to smoothly adjust data contaminated by noise [15]. Thus, GCV allows approximation of the minimum mean squared error (MSE), enabling the estimation of an optimal threshold without prior knowledge of the noise level [16]. The GCV procedure consists of systematically excluding each data point during the estimation process, then predicting its value and comparing it with the observed value; the GCV-based threshold estimation function is defined as [17]:

$$GCV_a(\lambda) = \frac{1}{N} \frac{\left|\left|\left|T_s(a)\right| - \underline{T}(\lambda(a))\right|\right|^2}{\left|\frac{N_0(\lambda(a))}{N}\right|^2} \quad (5)$$

$$\underline{T}(\lambda(a)) = sign(T_s(a))[|T_s(a)| - \lambda(a)]_+ \quad (6)$$

where $T_s(a)$ represents the original SS-CWT coefficients, $\underline{T}(\lambda(a))$ denotes the thresholded coefficients, $N_0(\lambda(a))$ is the number of coefficients set to zero after thresholding, and N is the total number of coefficients. This formulation allows evaluation of the error between the estimated and the original signal. The optimal threshold value $\lambda^*(a)$ is obtained by minimizing $GCV_a(\lambda)$, without requiring explicit estimates of the noise level.

To improve computational efficiency in the search for the optimal threshold, a fast search scheme based on the Fibonacci method is employed, which restricts the search range to the minimum and maximum values of the wavelet coefficients at each scale [18].

Once $\lambda^*(a)$ is determined, the SS-CWT coefficients are processed using a scale-by-scale hard-thresholding strategy:

$$\underline{T}_s^h(\lambda(a)) = T_s(a)I(|T_s(a)| \geq \lambda^*(a)) \quad (7)$$

where $I(.)$ is the unit step function. This procedure primarily removes noise components present in the signal, allowing a more concentrated time-frequency representation and improved signal estimation through the inverse transform (Equation 4).

2.3 Pixel connectivity thresholding

Once the GCV process has been applied, which typically removes most of the noise present in the signal, a small number of wavelet coefficients associated with noise still remain in the time-frequency domain, which may continue to hinder the extraction of relevant information from the signal. Unlike the coefficients associated with the seismic signal, those corresponding to residual noise tend to be more dispersed and exhibit low connectivity in the time-frequency domain. Based on this, an approach known as pixel connectivity thresholding is applied to eliminate the residual noise [19].

Pixel connectivity is defined as the relationship between two adjacent pixels that share either an edge or a vertex in a two-dimensional image. This connectivity can be established by considering only horizontal and vertical directions, or by also including diagonal connections [19], as shown in Figure 2. In this study, all directions are considered in order to achieve better identification of connected regions.

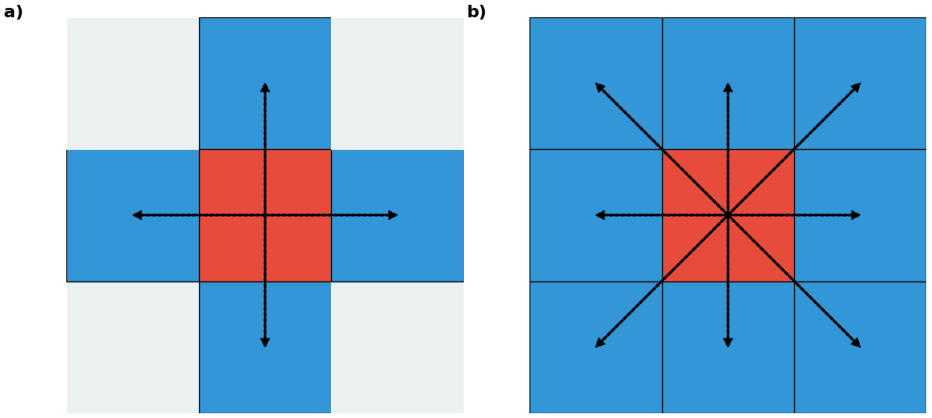


Figure 2 – (a) Orthogonal connectivity covering four directions (up, down, left, and right). (b) Full connectivity covering eight directions (including orthogonal neighbors and the four diagonals).

2.4 STA/LTA Algorithm

The STA/LTA algorithm is a technique for the automatic detection of seismic events. The method is based on the continuous calculation of the ratio between a short-term average (STA) and a long-term average (LTA) [20], defined as:

$$STA = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} y_{k,n} \quad (8)$$

$$LTA = \frac{1}{N_L} \sum_{n=-N_L}^{N_s} y_{k,n} \tag{9}$$

where the ratio is defined as $R(t) = STA/LTA$. The STA corresponds to an average computed over a short window of N_s samples, making it sensitive to rapid changes associated with the arrival of seismic waves, while the LTA is computed over a longer window of N_L samples and represents the average background noise level. Both averages are derived from a characteristic function of the signal $y = g(x)$. When the ratio $R(t)$ exceeds a defined threshold, a seismic event is detected and remains active as long as the ratio stays elevated, ending only when it falls below a deactivation threshold, indicating that the signal has returned to the noise level [21].

2.5 Seismic data denoising

In this section, the general procedure of the *Denoising* method applied to microseismic data is presented. Figure 3 shows the process flowchart, which integrates the SS-CWT transform, automatic threshold selection using GCV, and the pixel connectivity thresholding stage. This approach enables progressive noise removal and reconstruction of the signal with improved definition of its seismic components.

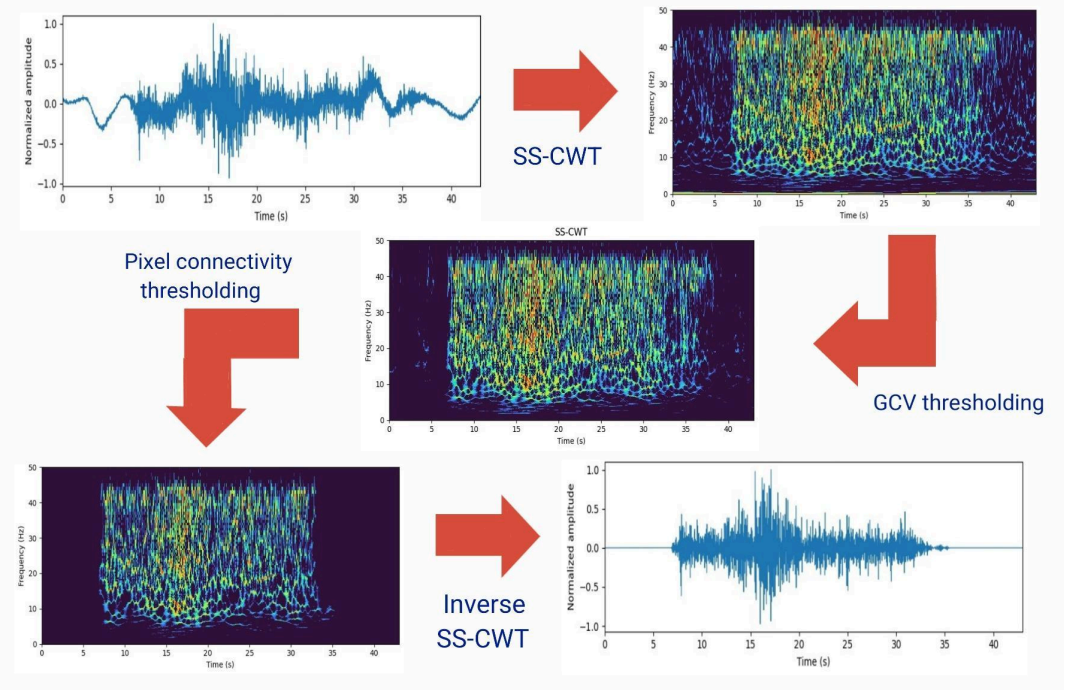


Figure 3 – Flowchart of the proposed SS-CWT-based *Denoising* method

3. RESULTS

3.1 Reservoir-induced seismicity

The denoising method was applied to signals corresponding to events induced by the EHU-MS reservoir. Figure 4(a) shows a coda magnitude (Md) 0.6 event recorded by a local seismic station and its corresponding spectrogram. Figure 4(b) presents the

signal filtered using a Butterworth band-pass filter (3-30 Hz), where an improvement in SNR is observed. Figure 4(c) shows the same signal processed using the proposed method, evidencing an even more significant improvement in SNR.

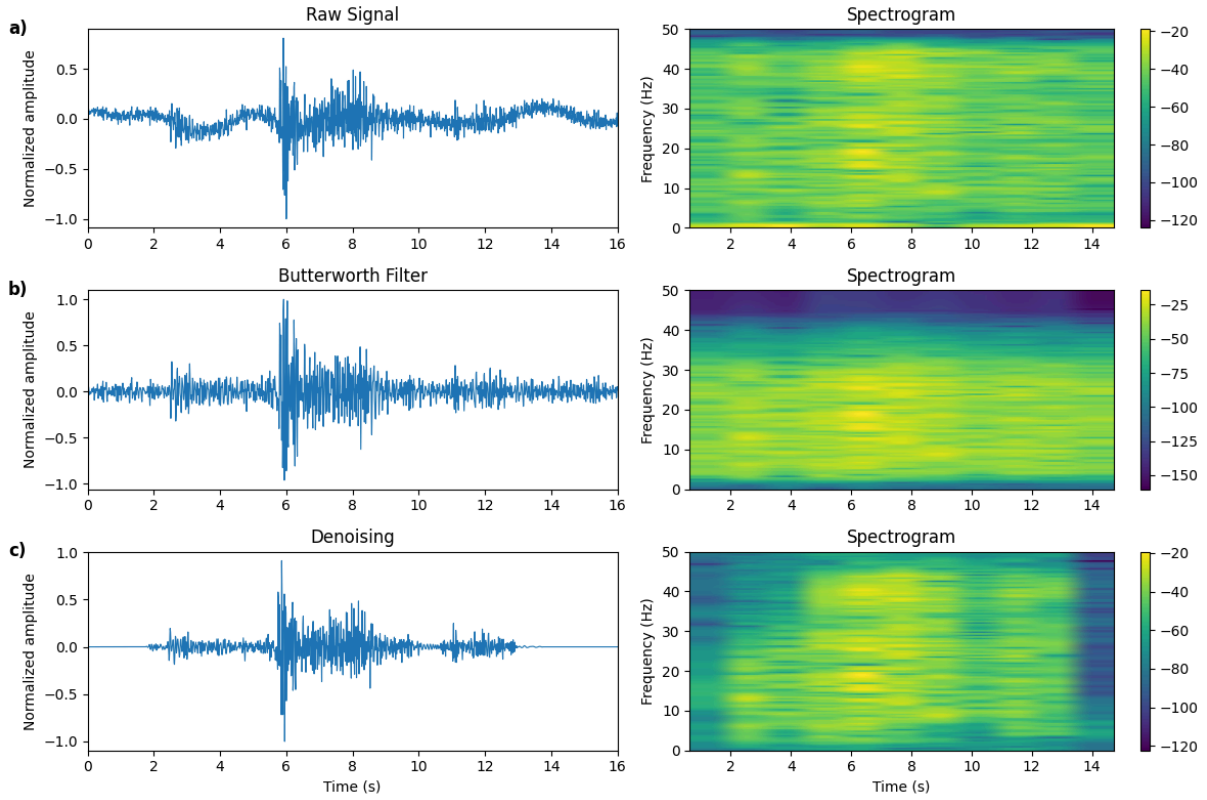


Figure 4 – Seismic signal in the time domain and its time-frequency representation using spectrograms. Comparison of (a) the original signal, (b) the signal filtered with a Butterworth band-pass filter, and (c) the signal filtered using the *Denoising* method.

The original signal exhibits a relatively low noise level, and conventional filtering already allows clear identification of the P and S phases. Nevertheless, the proposed method further enhances this identification, validating its proper performance. However, slight variations in the waveform are observed between the two filtering approaches, as the proposed method tends to attenuate certain segments of the signal. This behavior demonstrates its robustness, prioritizing coherent energy groupings in the time-frequency domain, as observed in the SS-CWT spectrum (Figure 5). Since microseismic events are characterized by low energy release, the identification of such groupings may be limited, making full signal reconstruction more challenging. Consequently, precise estimation of the magnitude of microseismic events using this approach may present certain limitations.

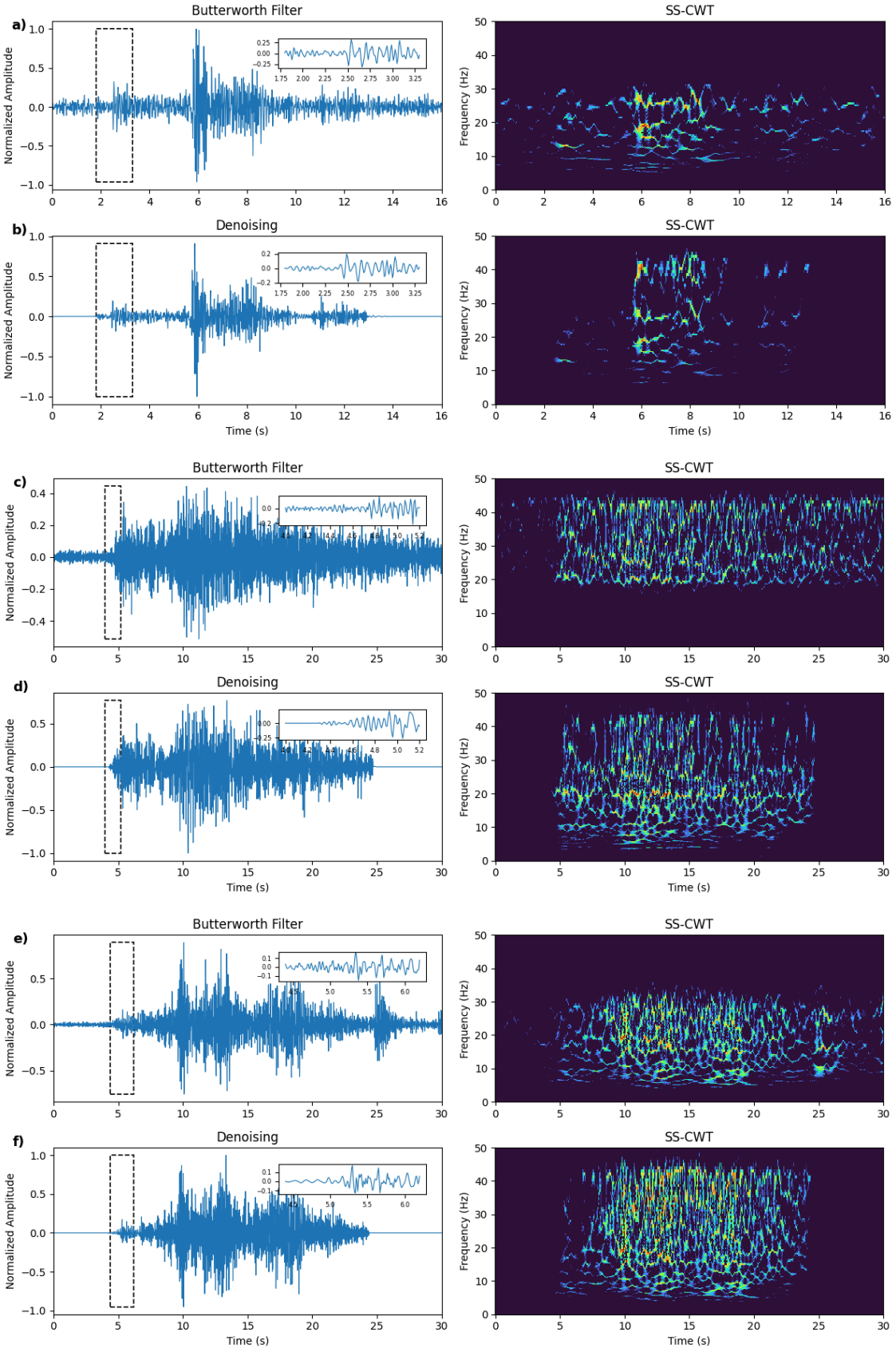


Figure 5 – Records of microseismic events induced by the EHU-MS reservoir: (a) Md 0.6 event filtered using Butterworth and (b) processed with the *Denoising* method; (c) Md 1.1 event filtered using Butterworth and (d) processed with *Denoising*; (e) Md 0.9 event filtered using Butterworth and (f) processed with *Denoising*.

3.2 Natural seismicity

The method was also applied to regional and local natural seismic events. In the SS-CWT spectra corresponding to the signals processed with *Denoising* (Figure 6), a better concentration of signal energy is observed, particularly in regions associated with seismic phases, where they appear more clearly defined. As shown in Figure 6(b), the *Denoising* process applied to a regional event yields a clearer definition of the P phase compared to the Butterworth-filtered signal (3-30 Hz). For local natural seismicity presented in Figure 6(d), a similar improvement is observed relative to conventional filtering (20-49 Hz).

Regarding the coda, a significant attenuation is observed in both cases, resulting in a more irregular waveform toward the end of the signal. However, since the primary objective of this study is to improve seismic phase identification, this effect is of secondary importance.

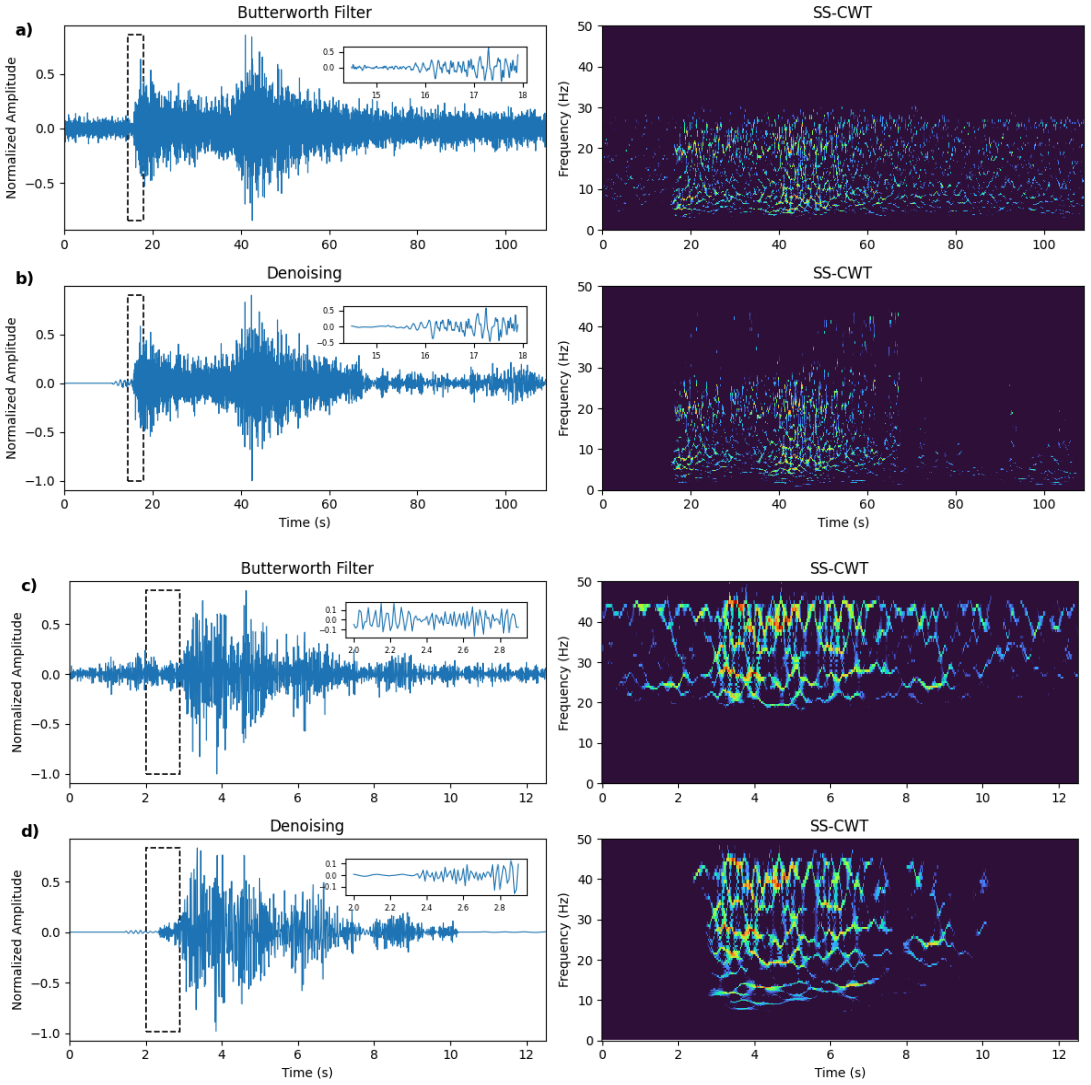


Figure 6 – (a) Seismic record of a regional natural event (Md 2.9) filtered using Butterworth; (b) result of the *Denoising* process for the same event; (c) record of a local natural event (Md 1.0) filtered using Butterworth; and (d) result of the corresponding *Denoising* method.

3.2 Mining-induced seismicity

The third test was conducted using anthropogenic seismicity generated by a mine blast near the EHU-MS. The seismic signal processed with a Butterworth band-pass filter (20-49 Hz) shows a poorly defined onset and polarity of the P phase. In contrast, the signal processed using the *Denoising* method exhibits a clearer definition of the P-phase polarity, although some noise is still observed prior to its arrival.

Regarding the S phase, whose amplitude in explosive events is typically not greater than that of the P phase [22], it preserves its waveform without significant distortion. Likewise, the coda associated with this phase is largely recovered, as shown in Figure 7(b), where the energy released by the explosive event appears well concentrated in the SS-CWT spectrum.

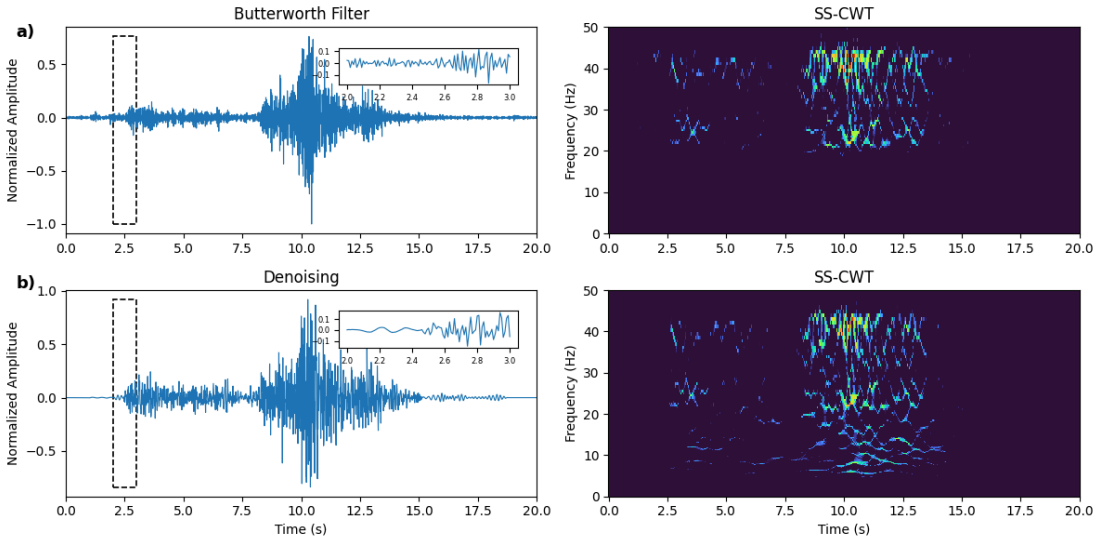


Figure 7 – Seismic record of an anthropogenic event (Md 1.0) associated with a mining explosion located approximately 60 km from the EHU-MS: (a) signal filtered using Butterworth; and (b) result of the *Denoising* process.

4. DISCUSSIONS

The removal of background noise in microseismic signals using wavelet-based techniques is a highly important application, as it improves the quality of these records, particularly those associated with reservoir-induced seismicity. Ideally, the original waveform associated with the seismic event should be preserved as much as possible, especially the portions corresponding to the seismic phases.

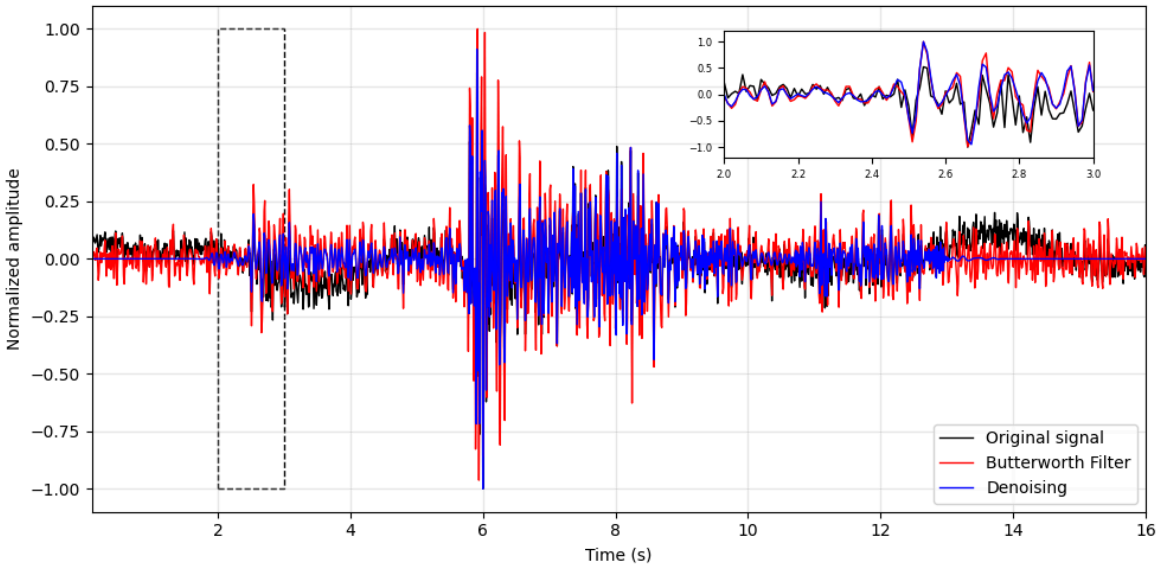


Figure 8 – Comparison of the waveform of a microseismic event with Md 0.6, showing the original signal, the signal filtered using a Butterworth filter, and the signal processed with the proposed method (*Denoising*).

Figure 8 presents a comparison between the original signal, the Butterworth-filtered signal, and the one obtained using the proposed *Denoising* method. The results show that the developed method does not introduce significant distortions in the polarity of the P phase; on the contrary, it allows for a clearer definition, facilitating its identification.

The SNR is one of the most relevant parameters for evaluating the quality of a seismic signal, as it directly affects seismic phase identification; moreover, an increase in SNR allows for the detection of a greater number of low-magnitude seismic events [23]. In this analysis, the improvement in SNR achieved using Butterworth filtering and *Denoising* was evaluated. The obtained values show that both methods contribute to signal improvement. Butterworth filtering yields an average SNR of 7.07 dB, whereas the *Denoising* method reaches an average value of 164.38 dB. The latter exhibits a much more significant increase in SNR across all analyzed events (Figure 9).

As shown in Table 1, the signals processed using the *Denoising* method exhibit high SNR values (>100), indicating efficient noise removal performance. This behavior is mainly due to the application of the GCV criterion on the time-frequency representation of the signal, which enables optimal threshold estimation and the removal of low-energy components associated with noise. In addition, pixel connectivity thresholding further refines this process by eliminating dispersed coefficients and preserving only coherent energy structures, resulting in cleaner signals with reduced impulsive noise.

Table 1 – Comparison of SNR improvement using Butterworth filtering and *Denoising*.

N°	Date	Time (UTC)	Event type	Md	Δ km	Original SNR (dB)	ΔSNR Butterworth (dB)	ΔSNR *Denoising* (dB)
1	2026/02/25	15:14:03	Reservoir-induced	0,5	34,81	-2,04	13,33	132,25
2	2026/02/15	14:45:59	Reservoir-induced	0,5	27,56	-3,85	5,88	121,21
3	2026/02/14	22:00:19	Reservoir-induced	0,6	52,85	-6,70	11,79	129,25
4	2026/02/11	03:03:01	Natural local	0,9	27,2	-4,04	12,00	176,75
5	2026/02/10	19:01:14	Reservoir-induced	1,0	53,57	-5,19	17,30	189,62
6	2026/02/09	20:41:46	Natural regional	2,9	168,57	-10,23	17,81	184,25
7	2026/02/08	00:55:17	Reservoir-induced	0,7	21,01	-2,30	5,90	173,33
8	2026/02/07	08:02:13	Mining-induced	1,3	32,83	-11,30	7,24	160,64
9	2026/02/02	19:26:41	Reservoir-induced	0,8	31,76	-12,30	16,62	186,11
10	2026/01/26	14:20:51	Natural local	1,0	26,31	7,38	4,12	166,34
11	2026/01/26	14:20:30	Reservoir-induced	1,1	33,86	-6,07	15,86	182,41
12	2026/01/25	07:55:25	Natural local	1,0	37,06	-2,88	14,30	187,46
13	2026/01/20	02:32:18	Reservoir-induced	0,6	22,33	-2,16	11,53	185,18
14	2026/01/10	02:14:18	Reservoir-induced	0,9	27,46	-5,09	8,67	185,15
15	2025/12/27	19:33:20	Mining-induced	1,0	59,65	-6,38	20,17	180,98

Moreover, microseismic events generally exhibit an SNR below 0 dB, making them difficult to observe, as their amplitudes are weaker than the background noise amplitude. High-frequency microseismic signals are often masked by low-frequency noise. The *Denoising* method has successfully improved seismic signals with negative SNR values.

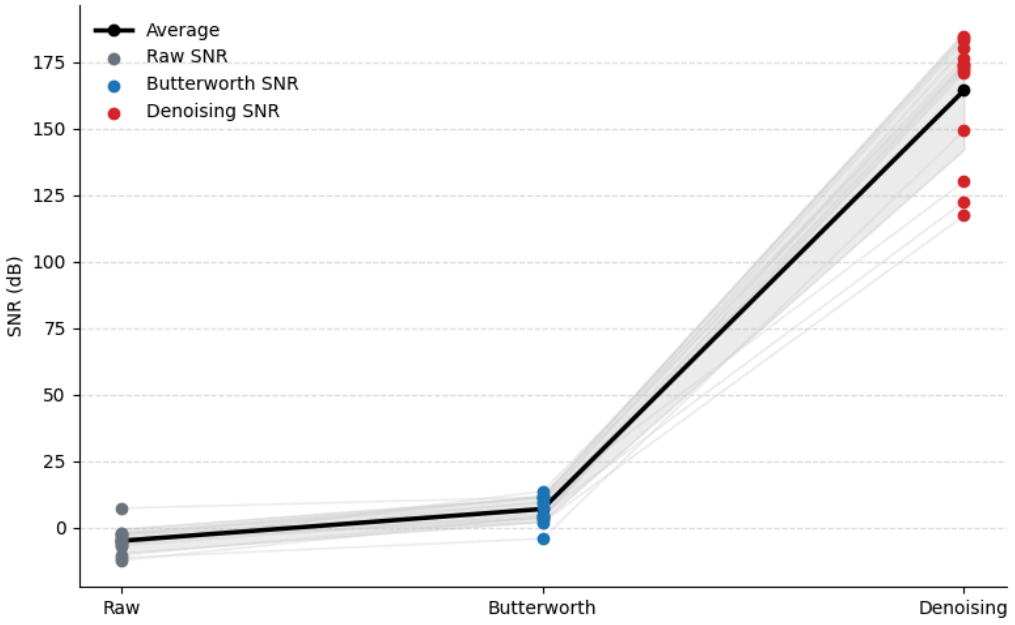


Figure 9 – Comparison between the average SNR of the original signals and the average SNR after Butterworth filtering and *Denoising*.

Regarding phase picking, particularly for the P phase, Figure 10 shows the arrival times obtained using the evaluated methods: Butterworth filtering, *Denoising*, and the STA/LTA algorithm. The latter is a widely used technique for the automatic detection of microseismic events with negative SNR [24], designed to identify significant amplitude changes in a continuous seismic signal and distinguish them from environmental noise.

In all cases, differences in picking times are observed. In Figure 10(a), the difference between the filtering methods is 0.02 s, while between the *Denoising* method and the STA/LTA algorithm it reaches 0.12 s. Similarly, in Figure 10(b), the difference between the filtering methods is 0.15 s, and between *Denoising* and STA/LTA it is 0.21 s. These discrepancies are expected, as the STA/LTA algorithm relies on temporal windows (short and long) to detect changes in signal energy, which can introduce delays in estimating arrival times compared to methods based on direct waveform analysis, such as the proposed approach.

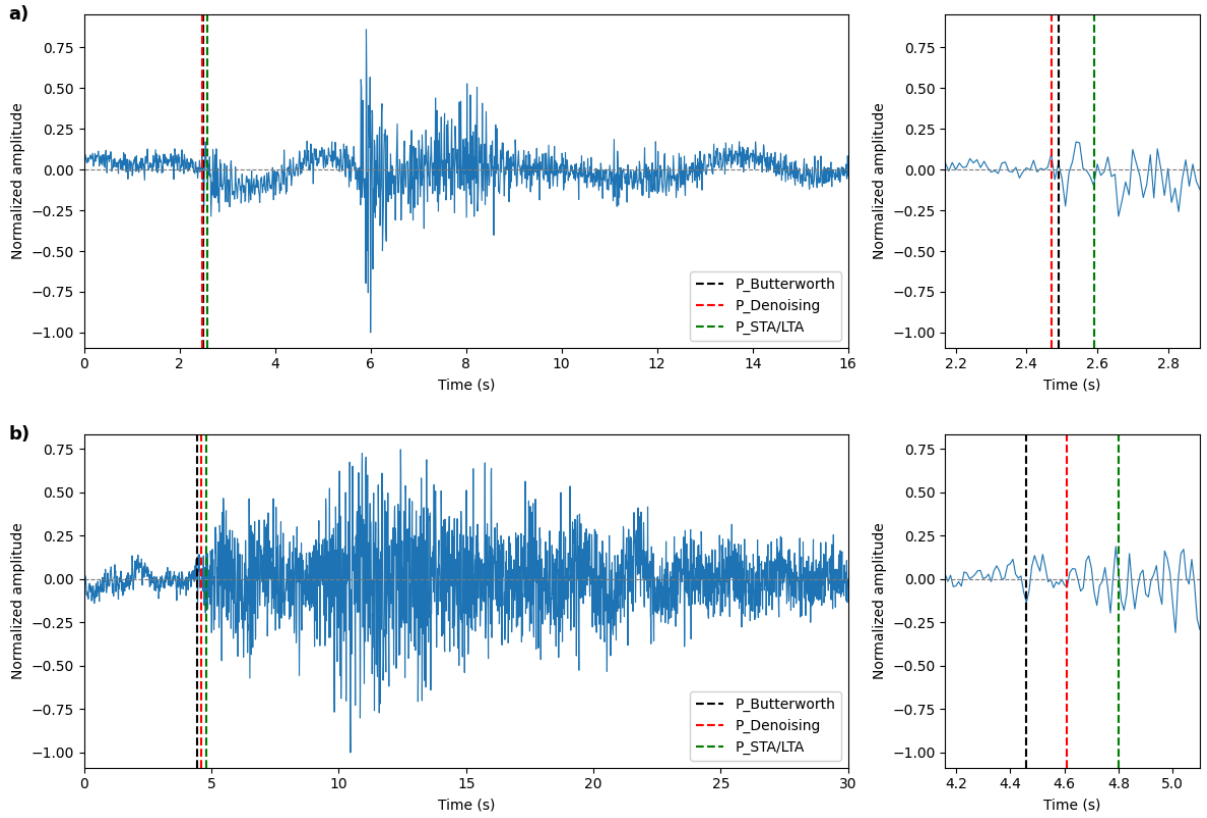


Figure 10 – Comparison of P-phase picking using Butterworth filtering, the *Denoising* method, and the STA/LTA automatic detection algorithm for induced events: (a) Md 0.6 event from the original unfiltered signal; and (b) Md 1.1 event under the same conditions.

However, the use of filtering techniques such as the proposed *Denoising* method to improve seismic phase identification provides higher-quality data, which can help optimize the performance of automatic detection methods. In this sense, improved signal quality facilitates the calibration of these algorithms through better parameter selection, increasing their accuracy and reliability. Furthermore, this approach may be useful for the training and application of more advanced algorithms based on neural networks and machine learning techniques.

In addition, the SS-CWT spectral analysis of the signals processed in this study shows that seismic noise is mainly concentrated in two frequency ranges: low frequencies (0.1-3 Hz) and high frequencies (40-49.9 Hz). These frequency bands may be associated with various noise sources, including environmental factors (such as wind, rainfall, or biological activity typical of the tropical environment of the EHU-MS) as well as anthropogenic sources related to nearby urban areas surrounding the dam.

5. CONCLUSIONS

A parameter-free adaptive denoising workflow based on the Synchrosqueezed Continuous Wavelet Transform (SS-CWT) was developed and applied to seismic data associated with reservoir-induced, natural, and controlled-source seismicity. The methodology integrates automatic threshold estimation using Generalized Cross-Validation (GCV) with pixel-connectivity analysis in the time-frequency domain, enabling objective suppression of noise-related components without manual parameter tuning.

Comparison between original and filtered records demonstrates a substantial improvement in the clarity of P-wave arrivals when the proposed approach is applied. Relative to conventional Butterworth band-pass filtering, the SS-CWT *Denoising* method consistently achieves higher signal-to-noise ratios and improved definition of seismic phases. The method proved robust across diverse datasets, including reservoir-induced seismicity at the Serra da Mesa Hydroelectric Dam, regional and local natural earthquakes, and explosion-generated controlled-source events. In all cases, significant noise reduction was observed, with SNR gains exceeding 100 dB, even for signals with initial SNR values below 0 dB.

The application of the STA/LTA detection algorithm highlights the strong dependence of automated picking on parameter selection, as inadequate configurations may lead to false or missed detections. The comparison between manual and automatic phase picking indicates that, while STA/LTA provides an efficient framework for automation, expert manual analysis remains essential for validation, particularly in low-SNR conditions.

Overall, the results demonstrate that combining advanced time-frequency denoising with automated detection techniques significantly improves the reliability of seismic phase identification and microseismic event location. The proposed methodology represents a practical and effective contribution to enhanced microseismic monitoring and to the assessment of dam safety in hydroelectric systems.

6. KEYWORDS

Synchrosqueezed Continuous Wavelet Transform (SS-CWT); reservoir-induced seismicity; microseismic monitoring; seismic denoising; dam safety assessment.

7. REFERENCES

[1] Ruiz-Barajas, S., Santoyo, M. A., Benito Oterino, M. B., Alvarado, G. E., &

Climent, A. (2019). Stress transfer patterns and local seismicity related to reservoir water-level variations. A case study in central Costa Rica. Scientific Reports, 9(1), 5600.

[2] Talwani, P. (1997). On the nature of reservoir-induced seismicity. Pure and applied Geophysics, 150(3), 473-492.

[3] Simpson, D. W., Leith, W. S., & Scholz, C. H. (1988). Two types of reservoir-induced seismicity. Bulletin of the Seismological Society of America, 78(6), 2025-2040.

[4] Gupta, H. K. (1992). Reservoir induced earthquakes (Vol. 64). Elsevier.

[5] Assumpção, M., Marza, V., Barros, L. et al. (2002). Reservoir-induced seismicity in Brazil. Pure and Applied Geophysics, 159(1), 597-617.

[6] Boore, D. M. (2005). On pads and filters: Processing strong-motion data. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(2), 745-750.

[7] Sriyanto, S. P. D., Puhi, A. R., & Sibuea, C. H. G. (2023). The performance of Butterworth and Wiener filter for earthquake signal enhancement: a comparative study. Journal of Seismology, 27(1), 219-232.

[8] Douglas, A. (1997). Bandpass filtering to reduce noise on seismograms: Is there a better way?. Bulletin of the Seismological Society of America, 87(3), 770-777.

[9] Mallat, S. (1999). A wavelet tour of signal processing. *Elsevier*.

[10] Chen, Y., Liu, T., Chen, X., Li, J., & Wang, E. (2014). Time-frequency analysis of seismic data using synchrosqueezing wavelet transform. In SEG International Exposition and Annual Meeting (pp. SEG-2014). SEG.

[11] Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., & Giard, D. (1982). Wave propagation and sampling theory; Part I, Complex signal and scattering in multilayered media. *Geophysics*, *47*(2), 203-221.

[12] Daubechies, I. (1992). *Ten lectures on wavelets.* Society *for industrial and applied mathematics*.

[13] Daubechies, I., Lu, J., & Wu, H. T. (2011). Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool. *Applied and computational harmonic analysis*, *30*(2), 243-261.

[14] Thakur, G., Brevdo, E., Fučkar, N. S., & Wu, H. T. (2013). The synchrosqueezing algorithm for time-varying spectral analysis: Robustness properties and new paleoclimate applications. *Signal processing*, *93*(5), 1079-1094.

[15] Jansen, M., & Bultheel, A. (1999). Multiple wavelet threshold estimation by generalized cross validation for images with correlated noise. *IEEE transactions on image processing*, *8*(7), 947-953.

[16] Weyrich, N., & Warhola, G. T. (1995). De-noising using wavelets and cross validation. In *Approximation Theory, Wavelets and Applications* (pp. 523-532). Dordrecht: Springer Netherlands.

[17] Jansen, M., Malfait, M., & Bultheel, A. (1997). Generalized cross validation for wavelet thresholding. *Signal processing*, *56*(1), 33-44.

[18] Mousavi, S. M., & Langston, C. A. (2017). Automatic noise-removal/signal-removal based on general cross-validation thresholding in synchrosqueezed domain and its application on earthquake data. *Geophysics*, *82*(4), V211-V227.

[19] Gonzalez, R. C. (2009). Digital image processing. *Pearson education india.*

[20] Allen, R. V. (1978). Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bulletin of the seismological society of America*, *68*(5), 1521-1532.

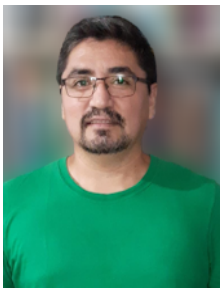
[21] Trnkoczy, A. (2012). Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. In New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP-2) (pp. 1-20). Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.

[22] Kim, S., Lee, K., & You, K. (2020). Seismic discrimination between earthquakes and explosions using support vector machine. *Sensors*, *20*(7), 1879.

[23] Godano, C., Convertito, V., & Pino, N. A. (2021). The signal to noise ratio and the completeness magnitude: the effect of the COVID-19 lockdown. *Atmosphere*, *12*(5), 525.

[24] Li, Y., Ni, Z., & Tian, Y. (2018). Arrival-time picking method based on approximate negentropy for microseismic data. Journal of Applied Geophysics, 152, 100-109.

	**HUAMANI HUAMANI, Ivan Fernando** Undergraduate student in Geophysical Sciences at Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Peru. Currently working as a Seismology Analyst at GEOONDAS Geofísica e Sensoriamento Remoto Ltda. Experience in seismic data acquisition and processing, and in methods such as H/V (Nakamura), seismic refraction, MASW, and electrical resistivity tomography. Also involved in applied seismology research.
	**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.
	MOREIRA VILHENA, Ricardo Geological Engineer with an MSc in Geotechnics (UFG), Specialist in Geoprocessing and Dam Safety (UFBA), and BIM Manager at Zigurat Global Institute of Technology. Experience in public and private sectors within the energy industry, working on geological and geotechnical studies for hydroelectric projects. Currently involved in dam safety management at Eletrobras.
	**YCHOCAN ACHAHUI, Dayann Kinberly** Undergraduate student in Geophysical Sciences at Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Peru, with training in seismology, instrumentation, and seismic monitoring. Currently a Seismology Analyst at GEOONDAS Geofísica e Sensoriamento Remoto Ltda., with experience in Python for data analysis and participation in international courses and conferences related to applied geology.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.4
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

INTERFEROMETRIA SÍSMICA APLICADA AO MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS: UMA NOVA ABORDAGEM PARA SISTEMA DE ALERTAS PRECOCES EM BARRAGENS E PILHAS DE REJEITO

Thiago Patrick Pereira Da CRUZ
Geofísico - Tetra Tech

Christine De Oliveira Silva ALFRADIQUE
Engenheira Civil - Tetra Tech

Matheus Rodrigues CUNHA
Geofísico - Tetra Tech

Claus Naves EIKMEIER
Geofísico - Tetra Tech

Hernan Eduardo Martínez CARVAJAL

Engenheiro Geólogo - Tetra Tech

RESUMO

Monitorar a integridade de estruturas críticas, entre elas barragens e pilhas de rejeito, é um desafio da geotecnia. Nesse contexto, aplicam-se rotineiramente técnicas de monitoramento geotécnico para garantir sua segurança. Apesar de sua ampla aplicabilidade, as técnicas tradicionais de monitoramento geotécnico apresentam uma limitação importante: são medidas reativas. Por isso, quando se busca avaliar alterações ao longo de toda uma estrutura, esses métodos podem não captar toda a extensão espacial das mudanças internas nem permitir a identificação antecipada de processos de degradação no maciço. A fim de superar essa limitação, outras técnicas avançadas de monitoramento vêm sendo exploradas, destacando-se a interferometria sísmica do ruído ambiente (ANSI). Este método permite o monitoramento contínuo e não invasivo dessas estruturas, avaliando sua integridade estrutural por meio da ocorrência natural de ondas sísmicas no ambiente. O monitoramento interferométrico mede, de forma indireta, a mudança de rigidez material e mudanças na densidade. A literatura indica que modos de falha como instabilidade, liquefação e erosão interna, podem ser identificados previamente a partir da análise dos resultados de interferometria. Assim, conclui-se que a ANSI pode ser utilizada de forma eficaz como ferramenta de monitoramento estratégico, permitindo a detecção antecipada de processos de degradação interna e possibilitando que organizações atuem preventivamente, muitas vezes com semanas ou meses de antecedência em relação ao acionamento de sistemas de alerta crítico. A experiência dos autores em monitoramento microssísmico de barragens de rejeito permitiu o desenvolvimento de um plano de ação executivo para a implementação de um sistema de alerta precoce (*Early Warning System* —

EWS) baseado em ANSI. Esse plano de ação é dividido em seis etapas, desde a definição de parâmetros estruturais preliminares até a implementação do sistema de alerta. As etapas elencadas do plano de ação foram aplicadas em três barragens, contribuindo para a identificação de anomalias e ações preventivas. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o sistema de alerta precoce baseado nos dados de ANSI tem um grande potencial para aprimorar o monitoramento geotécnico.

ABSTRACT

Monitoring the integrity of critical structures, including dams and tailings piles, is a major challenge in geotechnical engineering. In this context, geotechnical monitoring techniques are routinely applied to ensure their safety. Despite their broad applicability, traditional geotechnical monitoring techniques present a significant limitation: they are reactive measurements. As such, when assessing changes throughout an entire structure, these methods may fail to capture the full spatial extent of internal changes and may not allow for the early identification of degradation processes within the structure.. To overcome this limitation, other advanced monitoring techniques have been explored, with particular emphasis on Ambient Noise Seismic Interferometry (ANSI). This method enables continuous and non-invasive monitoring of critical structures, assessing their structural integrity through the naturally occurring seismic waves in the environment. Interferometric monitoring indirectly measures changes in material stiffness (and/or changes in density). The literature indicates that failure modes such as instability, liquefaction, and internal erosion can be identified in advance through the analysis of interferometric time series. Thus, it can be concluded that ANSI can be effectively employed as a strategic monitoring tool, enabling the early detection of internal degradation processes and allowing organizations to act preventively, often with weeks or months of lead time relative to the activation of critical alert systems. The authors experience in microseismic monitoring of tailings dams has enabled the development of an executive action plan for the implementation of an Early Warning System (EWS) based on ANSI. This action plan is divided into six stages, ranging from the definition of preliminary structural parameters to the deployment of the warning system. The stages outlined in the action plan were applied to three dams, contributing to the identification of anomalies and the adoption of preventive actions. Based on the results obtained, it is concluded that the early warning system based on ANSI data has great potential to enhance geotechnical monitoring.

1. INTRODUÇÃO

Monitorar a integridade de estruturas críticas, entre elas barragens e pilhas de rejeito, continua a ser um desafio para a geotecnia. Nesse contexto, aplicam-se rotineiramente técnicas de monitoramento geotécnico para garantir sua segurança. Equipamentos frequentemente utilizados incluem piezômetros que mede pressão de poro, bem como radar, prismas e inclinômetros, que medem deformação.

Apesar de sua ampla aplicabilidade, as técnicas tradicionais de monitoramento geotécnico apresentam uma limitação importante: são medidas reativas. Por isso, quando se busca avaliar alterações ao longo de toda uma estrutura, esses métodos podem não captar toda a extensão espacial das mudanças internas nem permitir a identificação antecipada de processos de degradação no maciço.

A fim de superar essa limitação, outras técnicas avançadas de monitoramento vêm sendo exploradas, destacando-se a interferometria sísmica de ruído ambiente. Esse método permite o monitoramento contínuo e não invasivo de estruturas críticas, avaliando sua integridade estrutural a partir das ondas sísmicas naturalmente presentes no ambiente. Por meio da análise interferométrica, é possível detectar, de forma indireta, variações de rigidez e densidade no interior da estrutura, o que possibilita a identificação precoce de modos de falha como instabilidade, liquefação e erosão interna.

A interferometria sísmica de ruído ambiente apresenta, portanto, grande potencial como base para sistemas de alerta precoce em estruturas geotécnicas. Nesse sentido, a experiência dos autores em diversos casos de monitoramento microssísmico permitiu a elaboração de um plano de ação executivo para a implantação desses sistemas em barragens e pilhas de rejeito. O plano proposto considera as realidades regulatórias vigentes, os aspectos socioambientais envolvidos e o nível de gerenciamento de risco exigido por esse tipo de estrutura.

Este artigo tem como objetivo apresentar uma metodologia para a implementação de sistemas de alerta precoce baseados em interferometria sísmica de ruído ambiente, e está estruturado da seguinte forma: inicialmente, define-se a interferometria sísmica de ruído ambiente, sua relação com fenômenos geotécnicos relevantes e discute-se seu potencial como sistema de alerta; posteriormente, apresenta-se as etapas necessárias para implementação da interferometria sísmica como sistema de alerta precoce; em seguida, apresenta-se o conceito de sistemas de alerta precoce; na sequência, são apresentados os resultados de sua aplicação em três barragens; por fim, expõem-se as conclusões obtidas.

2. INTERFEROMETRIA

A interferometria sísmica refere-se à geração de uma resposta sísmica a partir de uma fonte virtual, obtida através da correlação cruzada dos sinais registrados por diferentes sensores. Essa técnica pode ser aplicada utilizando fontes ativas e passivas. No caso da interferometria passiva, o ruído ambiente gera uma resposta sísmica determinística [1]. Em termos simples, considere dois sensores em um plano. A interferometria envolve correlacionar a resposta observada por esses dois sensores. Como resultado, é obtido um sismograma virtual equivalente a uma onda que se propagaria de um sensor para outro, como se um desses fosse a fonte do sinal. Repetindo esse processo ao longo tempo, a resposta desse par de sensor pode ser comparada.

Do ponto de vista prático, a interferometria sísmica é implementada por meio de geofones instalados na estrutura, os quais registram continuamente as vibrações do ruído sísmico ambiente. O sinal registrado é então processado por meio da correlação cruzada entre pares de sensores, resultando nos valores de variação relativa da velocidade da onda de cisalhamento (dv/v), parâmetro central para o monitoramento da integridade estrutural.

Variações nessa resposta ao longo do tempo refletem mudanças na velocidade da onda cisalhante no alvo, as quais se correlacionam com o módulo de rigidez e a densidade do material. Essas propriedades são diretamente influenciadas por fenômenos físicos inerentes ao ciclo de vida de estruturas geotécnicas, os quais

podem comprometer progressivamente sua estabilidade e se manifestar como variações detectáveis da onda cisalhante por meio da interferometria sísmica.

No contexto de barragens e pilhas de rejeitos, três fenômenos se destacam por sua relevância para a estabilidade estrutural e por sua capacidade de alterar a velocidade da onda cisalhante de forma detectável: o aumento do grau de saturação da massa de rejeitos, a erosão interna e as mudanças de compactação ou densidade do material.

O aumento da saturação de água dentro da massa de rejeitos pode levar a uma redução na velocidade da onda cisalhante. O aumento da pressão da água nos poros diminui a tensão efetiva, reduzindo assim a rigidez do material e a velocidade de propagação das ondas. Esse processo aumenta a probabilidade de liquefação, uma das principais causas de falhas em barragens de rejeitos.

A erosão interna, ou *piping*, que envolve a remoção gradual de partículas finas da estrutura da barragem pela água subterrânea em movimento, também pode causar uma diminuição na velocidade das ondas de cisalhamento. À medida que o material é erodido, a densidade e a rigidez geral das zonas afetadas são reduzidas, levando a uma mudança detectável nas velocidades das ondas sísmicas. Esse processo pode criar vazios e enfraquecer a estrutura interna da barragem.

Mudanças na compactação ou densidade do material de rejeito também podem se manifestar como variações na velocidade das ondas de cisalhamento. Uma diminuição na compactação ou densidade significa um material fofo, que é mais suscetível à deformação e falha sob imposição de tensões. Essa mudança no estado do material afeta diretamente a propagação da onda cisalhante.

Assim, considerando que a diminuição da rigidez é um processo precursor de mecanismos de falha, como liquefação, instabilidade e erosão interna, e considerando que estes fatores afetam a onda cisalhante afetando assim a interferometria sísmica, propõe-se que a interferometria sísmica do ruído ambiente pode atuar como sistema de alerta precoce.

Essa hipótese tem sido corroborada por estudos recentes. [2] [3], [4] e [5] demonstraram, de forma independente, que a diminuição da velocidade da onda cisalhante pôde ser observada dias antes da ocorrência de deslizamentos de terra. [6], por sua vez, demonstraram experimentalmente que a progressão da erosão interna em uma barragem foi identificada por meio de variações na velocidade das ondas registradas pelos sensores. Esses resultados evidenciam o potencial preditivo da técnica.

No entanto, apesar dos estudos indicarem a interferometria sísmica do ruído ambiente como um sistema de alerta precoce, a literatura não indica um fluxo de etapas que possibilite a execução de fato para este fim. Assim, com o objetivo de aplicar com sucesso a interferometria sísmica como sistema de alerta precoce, foi criado um fluxo de aplicação baseado na experiência dos autores e estudos de caso.

3. ETAPAS PARA APLICAÇÃO DA INTERFEROMETRIA SÍSMICA COMO SISTEMA DE ALERTA PRECOCE

A experiência prévia dos autores indica a utilização de 6 passos para a utilização da interferometria sísmica como sistema de alerta precoce. A figura 1 sumariza os passos necessários para aplicar de forma eficiente a metodologia.



Figura 1: Etapas para implementação do sistema de alerta precoce.

3.1 Estudos preliminares

Segundo [7], a implementação de um sistema de alerta precoce deve ser precedida por um conhecimento aprofundado da estrutura monitorada. Esse conhecimento envolve quatro aspectos principais: (i) a sensibilidade em profundidade do sistema de monitoramento; (ii) o intervalo de frequência a ser adotado; (iii) a realização de investigações para determinar os valores iniciais de V_s *in situ*; e (iv) a identificação das camadas suscetíveis à perda de velocidade, bem como das possíveis consequências dessa redução. Adicionalmente, é essencial compreender os limites de variabilidade natural e sazonal das velocidades, distinguindo flutuações esperadas daquelas que efetivamente representam risco à estrutura.

Nesse contexto, o uso de modelos geotécnicos das barragens e/ou pilhas, o estudo das características do rejeito e a investigação da sensibilidade, precisão e resolução dos sensores tornam-se etapas fundamentais para a caracterização adequada da estrutura na qual o sistema será instalado.

3.2 Linha de base do monitoramento

A definição de limiares de alerta é um dos elementos mais sensíveis e decisivos para a eficácia de sistemas de monitoramento por interferometria sísmica. Tais limiares determinam os gatilhos de resposta operacional e a escalada de ações preventivas, devendo refletir com precisão o comportamento histórico da estrutura e as características específicas do maciço monitorado.

Nesse sentido, é essencial o estabelecimento de uma linha de base temporal da velocidade das ondas de cisalhamento, obtida em condições reconhecidamente estáveis da estrutura. Essa referência representa a resposta interferométrica típica da barragem sob operação normal, capturando a variabilidade inerente decorrente de fatores como a compactação inicial dos rejeitos, a distribuição dos diferentes materiais na estrutura e as condições ambientais predominantes.

3.3 Monitoramento em tempo real

Uma vez definida a linha de base, a interferometria sísmica facilita o monitoramento contínuo da variação da velocidade cisalhante dentro da região de cobertura espacial do sistema. O sistema consiste em um arranjo de geofones instalados em uma determinada região, que transmite o sinal em tempo real para um database. Assim, a aquisição contínua de dados em escala 24/7, fornece uma visão em tempo real das condições internas do volume monitorado, permitindo o rastreamento imediato de mudanças no perfil de velocidade sísmica.

Esse acompanhamento contínuo representa uma vantagem importante em relação aos métodos tradicionais de monitoramento periódico, pois possibilita a detecção de anomalias à medida que se desenvolvem, fornecendo uma avaliação atualizada da integridade estrutural. Tal capacidade é essencial para identificar processos de evolução rápida que possam culminar em falha estrutural.

3.4 Integração com outras tecnologias

Segundo [7], a interferometria sísmica pode ser combinada a outros indicadores tradicionalmente utilizados em monitoramento geotécnico, como deslocamento, pluviometria e poropressão, a fim de contextualizar as mudanças observadas. Além desses instrumentos clássicos, a técnica também pode ser integrada ao Sensoriamento Distribuído por Fibra Óptica (DFOS), bem como a dados provenientes de outras abordagens de monitoramento.

Essa estratégia sinérgica, que integra os pontos fortes de diferentes tecnologias, permite uma avaliação mais precisa e confiável da estabilidade da estrutura monitorada

3.5 Detecção de anomalias

A grande quantidade de dados gerada por meio do monitoramento contínuo deve ser analisada usando algoritmos sofisticados, projetados para detectar desvios da linha de base estabelecida ou limiares de alerta. Esses algoritmos são programados para reconhecer padrões e anomalias nos dados de velocidade da onda cisalhante, identificando áreas dentro da barragem onde a velocidade está diminuindo.

O segundo passo após a detecção automática das anomalias é a interpretação dos dados, e validação dos processos ocorridos, mediante a análise multidisciplinar integrada, a fim de correlacionar as anomalias com fenômenos geotécnicos, operacionais ou ambientas, e assim definir a relevância do processo.

3.6 Sistema de alerta

O acoplamento do Sistema de Alerta Precoce baseado em Interferometria Sísmica constitui a etapa final e mais estratégica da implementação do sistema de monitoramento contínuo aplicado à estrutura. Neste contexto, alertas são emitidos após uma análise contextual abrangente, integrando múltiplas fontes de dados e a expertise de especialistas, assegurando respostas estruturadas e fundamentadas.

4. SISTEMAS DE ALERTA PRECOCE

A legislação brasileira é clara quanto a obrigação do empreendedor manter um sistema de monitoramento de barragem [8]. Além disso, em casos de estruturas com dano potencial associado alto, o monitoramento deve ser automatizado, com acompanhamento em tempo real e período integral, e contar com Sistemas de Alerta Precoce implementados em consonância com as características da barragem e com os critérios de acionamento relacionados a parâmetros de deformação e deslocamentos, cujos limites deverão ser definidos pelo projetista [8].

Assim, [9] define os sistemas de alertas precoces como “o conjunto de capacidades necessárias para gerar e disseminar informações de alerta oportunas e significativas para permitir que indivíduos, comunidades e organizações ameaçadas por um perigo se preparem e ajam de forma adequada e em tempo suficiente para reduzir a possibilidade de danos ou perdas”.

Estes sistemas são baseados primordialmente no acompanhamento ao longo do tempo de instrumentos, permitindo identificar e diferenciar comportamentos anômalos de comportamentos usuais. Neste sentido, os comportamentos anômalos, a depender da leitura dos instrumentos, podem ser considerados sinais precoces de instabilidade, fornecendo avisos oportunos para que sejam tomadas medidas preventivas.

Segundo [10], um sistema de alerta precoce deve contemplar três etapas. A primeira é o monitoramento, fase na qual ocorrem a aquisição e a transmissão dos dados, além das eventuais manutenções dos instrumentos. A segunda corresponde à análise e previsão, etapa em que são aplicados os limites, o julgamento e os métodos de previsão. Por fim, a terceira fase consiste nos alertas e respostas, momento em que as pessoas devem ser capazes de compreender os alertas emitidos e saber como reagir a eles. A Figura 2 apresenta um fluxograma proposto para representar esse processo.

Apesar da importância dessas etapas para a estruturação de sistemas de alerta precoce, o monitoramento geotécnico convencional, embora amplamente utilizado, tem se mostrado ineficaz para prever determinados tipos de rupturas em barragens [11]. Nesse contexto, emergiram pesquisas voltadas ao monitoramento geofísico ([12], [2], [13], [14], [6], [3], [4] e [15]), que propõem o uso de informações sísmicas provenientes do ruído ambiente como complemento aos instrumentos tradicionalmente empregados na geotecnia clássica.

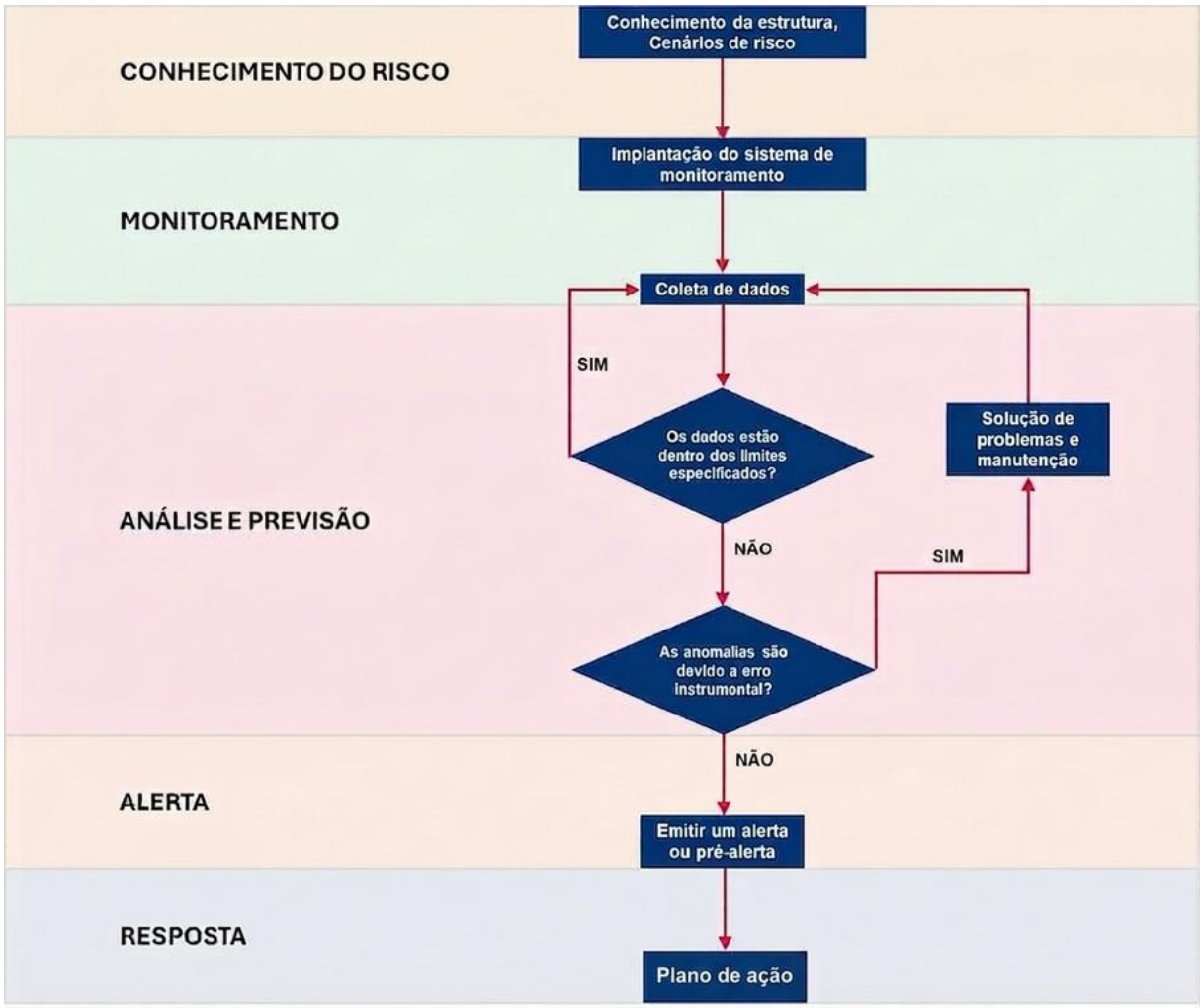


Figura 2 – Fluxograma de estágios de um sistema de alerta precoce genérico. Adaptado de [10].

5. RESULTADOS

Os passos apresentados durante a seção 4 foram desenvolvidos e refinados ao longo de mais de sete anos de aplicação no monitoramento microssísmico de estruturas geotécnicas. Ao longo desse período, diversos estudos de caso conduzidos em diferentes contextos operacionais demonstraram a robustez e a efetividade dessa abordagem para a identificação de processos precursores de instabilidade.

A tabela 1 apresenta três casos em que os passos foram aplicados de uma maneira adaptada, permitindo a identificação de anomalias e a implementação de ações preventivas.

As três barragens monitoradas neste estudo possuem dimensões típicas de estruturas de médio a grande porte, com alturas variando entre 30 e 60 metros e comprimentos de crista superiores a 500 metros. As estruturas encontram-se em diferentes estágios operacionais, incluindo operação regular e processos de descaracterização. O sistema de monitoramento empregado nas estruturas abrange, além da instrumentação sísmica (geofones), sensores piezométricos, estações topográficas e, em alguns casos, monitoramento remoto via InSAR. O período de acompanhamento

do registro contínuo dos dados de interferometria sísmica variou de 18 a 36 meses, permitindo a coleta de séries temporais de interferometria sísmica extensas para análise interferométrica. Todas as informações sensíveis, como localização exata e dados operacionais detalhados, foram preservadas em sigilo para garantir a confidencialidade dos projetos.

Tabela 1 – Estudos de caso da implementação do sistema de alerta precoce baseado em interferometria sísmica.

Estrutura	**Diminuição de dv/v**	**Ações aplicadas**	**Conclusões**
Barragem I	A Barragem I experimentou diminuição de até 6% no parâmetro, ao longo de alguns meses.	Após a identificação da diminuição de velocidade, foi realizada a comparação dos dados com outros instrumentos, revisão de dados, formulação de hipóteses e avaliação das condições operacionais.	Foi observado que a diminuição da velocidade estava relacionada principalmente às escavações realizadas no reservatório da barragem. Testes mostraram que a diminuição das escavações resultou na estabilização da diminuição de dv/v. Atualmente, o fenômeno segue sob investigação, para compreender melhor o processo a partir da ótica da geotecnia clássica.
Barragem II	A Barragem II experimentou diminuição de até 6% no parâmetro, ao longo de alguns meses.	Após a identificação da diminuição de velocidade, foi realizada a comparação dos dados com outros instrumentos, revisão de dados e formulação de hipóteses.	Ao longo de um período de cinco meses, a diminuição de dv/v foi observada em pontos específicos da barragem. Foram implementadas ações para investigar o fenômeno e, após três meses, a causa da diminuição de velocidade foi identificada e corrigida, prevenindo novas ocorrências desse tipo.
Barragem III	A Barragem III experimentou diminuição de até 10% no parâmetro, ao longo de alguns meses	Após a identificação da diminuição de velocidade, foi realizada a comparação dos dados com outros instrumentos, revisão de dados, formulação de hipóteses e avaliação das condições operacionais.	Foi observado que a diminuição da velocidade poderia estar relacionada as escavações realizadas no reservatório da barragem. No entanto, a diminuição da velocidade foi interrompida, o que foi interpretado como um sinal de reestabilização. Consequentemente, o evento deixou de ser investigado.

6. CONCLUSÕES

No contexto dos estudos de caso, a metodologia foi aplicada com sucesso em três barragens de rejeito, monitoradas continuamente ao longo de períodos que variaram entre 18 e 36 meses. Durante esse intervalo, o sistema demonstrou alta sensibilidade na detecção de anomalias relevantes, sem ocorrência de falsos positivos, o que evidencia sua robustez e confiabilidade operacional. Embora tenham sido apresentados resultados em três barragens, atualmente, o sistema está em operação

em um total de 18 estruturas, reforçando seu potencial de aplicação em diferentes contextos geotécnicos. Esses resultados práticos confirmam que a abordagem proposta pode ser integrada de forma eficiente aos programas de monitoramento existentes, contribuindo para a antecipação de eventos críticos e para a melhoria dos processos de gestão de risco em barragens e pilhas de rejeito.

7. PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento geotécnico; interferometria; barragens de rejeito; pilhas de rejeito; Early Warning systems.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] WAPENAAR, K., DRAGANOV, D., SNIEDER, R., CAMPMAN, X., & VERDEL, A. (2010). Tutorial on seismic interferometry: Part 1—Basic principles and applications. Ge.

[2] MAINSANT, G., LAROSE, C., BRÖNNIMANN, C., JONGMANS, D., MICHOUD, C., JABOYEDOFF, M. (2012), Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction, Journal of Geophysical Research: Earth Surface,117, F1.

[3] YFANTIS, G.; PYTHAROULI, S.; LUNN, R.J.; **CARVAJAL, H.E.M.**. Microseismic monitoring illuminates phases of slope failure in soft soils. ENGINEERING GEOLOGY, v. 280, p. 105940, 2021.

[4] YFANTIS, G.; PYTHAROULI, S.; LUNN, R.J.; **CARVAJAL, H.E.M.**. Determination of the seismic signatures of landslides in soft soils: A methodology based on a field scale shear box. ENGINEERING GEOLOGY, v. 279, p. 105853, 2020.

[5] FIOLLEAU, S., JONGMANS, D., BIÈVRE, G., CHAMBON, G., BAILLET, L., VIAL. B., (2020) Seismic characterization of a clay-block rupture in Harmalière landslide, French Western Alps, Geophysical Journal International, 221, 1777–1788.

[6] PLANÈS, T., MOONEY, M. A., RITTGERS, J. B. R., PAREKH, M. L., BEHM, M., SNIEDER, R. (2016). Time-lapse monitoring of internal erosion in earthen dams and levees using ambient seismic noise. Géotechnique, 66(4), 301-312.

[7] LE BRETON, M., BONTEMPS, N., GUILLEMOT, A., BAILLET, L., & LAROSE, E. (2021). Landslide monitoring using seismic ambient noise correlation: challenges and applications. Earth-Science Reviews, 216, 103518.

[8] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). (2022). Resolução N° 95, 07 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília, DF.

[9] UNISDR, UNOFDRR. (2009). Terminology on disaster risk reduction. Geneva, Switzerland.

[10] DI BIAGIO, E., & KJEKSTAD, O. (2007). Early warning, instrumentation and monitoring landslides. 2nd Regional Training Course, RECLAIM II, 29th January–3rd February.

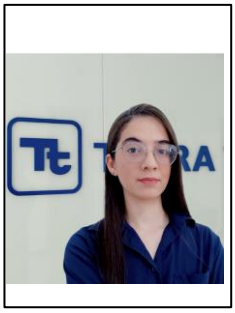
[11] ROBERTSON, P.K., DE MELO, L., WILLIAMS, D.J., & WILSON, G.W. (2019). Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I.

[12] BIÈVRE, G., FRANZ, M., LAROSE, E., CARRIÈRE, S., JONGMANS, D., & JABOYEDOFF, M. (2018). Influence of environmental parameters on the seismic velocity changes in a clayey mudflow (Pont-Bourquin Landslide, Switzerland). Engineering Geology, 245, 248-257.

[13] LAROSE, E., BONTEMPS, N., LACROIX, P., MAQUERHUA, E. T. (2017). Landslide monitoring in southern Peru: SEG Geoscientists without borders® project. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017, 5322-5326.

[14] BONTEMPS, N., LACROIX, P., LAROSE, E., JARA, J., TAIPE, E. (2020). Rain and small earthquakes maintain a slow-moving landslide in a persistent critical state. Nature Communications, 11, 780.

[15] HUSSAIN, Y.; **MARTINEZ-CARVAJAL, HERNAN**; CONDORI, C.; UAGODA, R.; CÁRDENAS-SOTO, MARTIN; CAVALCANTE, A. L. B.; CUNHA, L. S. ; S., MARTINO. Ambient Seismic Noise: A Continuous Source for the Dynamic Monitoring of Landslides. REVISTA TERRAE DIDATICA, v. 15, p. 1-5, 2019.

	**Thiago CRUZ** Geofísico formado pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Experiência com ênfase em geofísica de poço, eletrorresistividade e sismologia. Atua na Tetra Tech desde 2023 na execução de projetos de acompanhamento em tempo real de atividades, projetos de monitoramento microssísmico segundo a abordagem convencional e interferométrica, e em projetos de investigação geofísica.
	**Chistine ALFRADIQUE** Engenheira civil com ênfase em geotecnia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Experiência com geotecnia aplicada a microssísmica, geotecnia de mineração e modelagens numéricas tensão-deformação. Atua na Tetra Tech em projetos de barragens, pilhas, programas de monitoramento, dentre outros.

	**Matheus CUNHA** Geofísico formado pela Universidade de Brasília (UnB), mestre em geofísica aplicada pela mesma instituição e Doutorando em Geologia (UnB). Experiência com ênfase em métodos sísmicos, especialmente a sísmica de reflexão e sismologia, e processamento de sinal sísmico. Atua na Tetra Tech desde 2020 no desenvolvimento de projetos de monitoramento microssísmico de diversas estruturas geotécnicas.
	**Claus EIKMEIER** Geofísico formado pela Universidade de São Paulo (USP), mestre em Geofísica pela mesma instituição, Doutor em Mecânica Computacional pela Escola Politécnica da USP. Atua na Tetra Tech como Coordenador Técnico da equipe de geofísica no desenvolvimento e aprimoramento de metodologias para aquisição, processamento, inversão e interpretação de dados geofísicos, com foco em geotecnia e mineração.
	**Hernán CARVAJAL** Engenheiro Geólogo pela Universidade Nacional da Colômbia, mestre em mecânica dos solos pela Universidade Nacional Autônoma do México e Doutor em geotecnia pela Universidade de Brasília. Experiência em investigação geotécnica, modelagem de estabilidade e análise de riscos, e integração de dados multidisciplinares. Atua como Líder Técnico de Geotecnia na Tetra Tech em mineração e infraestrutura.

Comitê Brasileiro de Barragens
VI Simpósio sobre Instrumentação de Barragens e Estruturas Geotécnicas
Tema IN.4 Automatização e novas tecnologias de monitoramento
Belém – PA, 24 de setembro de 2026

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA E DA SUA DERIVADA TEMPORAL COMO VARIÁVEL AUXILIAR NO MONITORAMENTO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS: ESTUDO DE DADOS HISTÓRICOS E PROVA DE CONCEITO

André Luis Paiva CARRARA
Engenheiro de Controle e Automação – PROFICAM/UFOP; Instituto Tecnológico Vale (ITV)
Laryssa Aparecida Gomes FAGUNDES
Engenheira de Controle e Automação – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Gustavo PESSIN
Prof. D.Sc. – Instituto Tecnológico Vale (ITV); Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Alan Kardek Rêgo SEGUNDO
Prof. D.Sc. – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

RESUMO

O monitoramento da segurança de barragens depende de instrumentação e processamento confiáveis para caracterizar o comportamento hidráulico e identificar variações anômalas. Neste contexto, a velocidade de variação do nível d'água (derivada temporal do nível) constitui uma variável auxiliar por estar associada a mudanças de regime de escoamento. Este artigo apresenta um estudo composto por: (i) análise de dados históricos de instrumentos de nível, (ii) contextualização conceitual das ordens de grandeza por meio de um estudo técnico de referência e (iii) uma Prova de Conceito (PoC) experimental para validar a cadeia de aquisição e o cálculo online da derivada. Os resultados indicam que, em regime normal, as velocidades de variação são próximas de zero e significativamente inferiores às ordens de grandeza associadas a cenários extremos de escoamento. Na PoC, um sensor ultrassônico com saída 4–20 mA, um microcontrolador e um software em Python permitiram o registro contínuo, a filtragem por mediana e o cálculo contínuo de cm/min, demonstrando robustez diante do ruído e das limitações físicas do modelo reduzido. Conclui-se que a arquitetura proposta é reprodutível e adequada como base técnica para soluções de monitoramento integradas a outras variáveis instrumentais.

ABSTRACT

Dam safety monitoring depends on reliable instrumentation and processing to characterize hydraulic behavior and identify anomalous variations. In this context, the rate of change of water level (the time derivative of the level) is an auxiliary variable because it is associated with changes in the flow regime. This article presents a study composed of: (i) analysis of historical data from level instruments, (ii) conceptual contextualization of orders of magnitude through a reference technical study, and (iii) an experimental Proof of Concept (PoC) for

validation of the acquisition chain and online calculation of the derivative. The results indicate that, under normal conditions, the rates of change are close to zero and significantly lower than the orders of magnitude associated with extreme flow scenarios. In the PoC, an ultrasonic sensor with 4–20 mA output, a microcontroller, and Python software allowed continuous recording, median filtering, and real-time calculation of cm/min, demonstrating robustness against noise and physical limitations of the reduced model. It is concluded that the proposed architecture is reproducible and suitable as a technical basis for monitoring solutions integrated with other instrumental variables.

INTRODUÇÃO

Barragens de contenção de água e de rejeitos são estruturas críticas cuja integridade está diretamente associada à proteção de vidas, ao meio ambiente e à continuidade operacional. A experiência recente com incidentes no Brasil e no mundo reforça a necessidade de instrumentação adequada e de critérios objetivos de supervisão que reduzam o tempo de resposta em condições anômalas. Entre as variáveis monitoradas, o nível d'água possui interpretação hidráulica direta e pode ser medido por diferentes tecnologias, como piezômetros, sensores de pressão, ultrassom e radar. Além do valor absoluto do nível, a sua derivada temporal (velocidade de variação) pode atuar como variável auxiliar para identificar transições de regime de escoamento. Este trabalho apresenta uma abordagem composta por estudo de dados históricos, contextualização conceitual de ordens de grandeza e validação experimental em escala reduzida, com foco na cadeia de aquisição e no cálculo online da derivada do nível [2][11][14].

Em termos operacionais, a instrumentação de barragens deve combinar confiabilidade metrológica, continuidade de aquisição e aderência às condições ambientais impostas pelo campo. Nesse cenário, variáveis derivadas, como a velocidade de variação do nível, ganham relevância por sintetizarem tendências temporais que podem não ser imediatamente perceptíveis quando se observa apenas o valor absoluto do nível. A utilização dessa grandeza, entretanto, exige metodologia que integre linha de base histórica, referência conceitual e validação experimental da cadeia de medição e processamento [5][10][12].

Sob a ótica de programas de segurança, a adoção de variáveis auxiliares só se justifica quando existe rastreabilidade técnica entre a instrumentação empregada, o método de cálculo e o contexto de aplicação. Por essa razão, o artigo privilegia a discussão do nível d'água e da sua derivada temporal como elementos de monitoramento, evitando extrapolar os resultados para sistemas de alerta completos, cuja validação em ambiente real demandaria escopo adicional de integração, redundância e governança operacional [8][12].

1. Objetivo e escopo

O objetivo é avaliar a viabilidade de obtenção e processamento *online* da velocidade de variação do nível d'água, com robustez frente a ruído e leituras espúrias, utilizando uma arquitetura de instrumentação reprodutível. O estudo de referência de ruptura hipotética é utilizado apenas para contextualização conceitual de ordens de grandeza; a validação

experimental é conduzida como Prova de Conceito (PoC) de instrumentação, sem pretensão de reproduzir hidrodinâmica de ruptura em escala real.

2. MODOS DE FALHA E PAPEL DA VARIAÇÃO DO NÍVEL

Mecanismos de falha, como liquefação, *piping*, instabilidade de taludes e galgamento hidráulico, estão entre os mais relevantes para barragens de água e de rejeitos [3][4][1]. Embora distintos do ponto de vista geotécnico, tais mecanismos podem resultar em alterações do regime hidráulico do reservatório e, consequentemente, em variações anômalas do nível d'água. No galgamento, por exemplo, a transição para escoamento não controlado está associada a erosão do talude de jusante e formação de brecha, frequentemente acompanhada por queda abrupta e sustentada do nível [3]. Em fenômenos de *piping*, perdas internas e caminhos preferenciais podem modificar o balanço de massa do reservatório, produzindo tendências de esvaziamento não comandado [4][1].

A relevância da variável nível decorre de sua relação transversal com esses mecanismos. Em galgamento, a perda de controle hidráulico tende a produzir uma assinatura temporal abrupta no reservatório; em *piping*, alterações persistentes na velocidade de variação podem indicar perda de massa ou aumento de percolação; em instabilidades associadas à drenagem e ao recalque, a evolução conjunta de nível e pressão de poros pode servir como indicador complementar de diagnóstico. Isso não significa que a derivada do nível substitua a interpretação geotécnica, mas reforça seu valor como variável auxiliar em arquiteturas instrumentadas [1][3][4][10].

3. INSTRUMENTAÇÃO E ARQUITETURAS DE AQUISIÇÃO

O monitoramento de barragens utiliza instrumentação geotécnica e hidráulica para registrar variáveis como pressão de poros, deslocamentos e nível d'água. Piezômetros fornecem medições fundamentais para avaliação do estado hidráulico interno do maciço, ao passo que sensores de nível permitem medir diretamente a superfície livre do reservatório. Sensores ultrassônicos e radares realizam medições sem contato, reduzindo o desgaste mecânico e problemas de incrustação, e podem ser integrados a sistemas de aquisição industriais por meio de saídas padronizadas, como 4–20 mA [11][14].

No âmbito da medição de nível, diferentes princípios físicos podem ser adotados conforme a finalidade do monitoramento. Sensores de pressão e piezômetros são particularmente úteis para interpretar a resposta hidráulica interna do maciço e sua relação com a carga piezométrica. Já sensores ultrassônicos e radares oferecem medições diretas da superfície livre, com menor intrusividade e maior simplicidade de instalação em pontos representativos do reservatório [10][11][12][14].

A decisão entre essas tecnologias deve considerar resolução temporal, robustez ambiental, custo de implantação, manutenção e a natureza da variável que se pretende monitorar. Em aplicações onde a grandeza de interesse é a velocidade de variação do nível, a continuidade do sinal, a estabilidade do condicionamento e a rastreabilidade metrológica tornam-se fatores tão relevantes quanto a exatidão absoluta do valor medido [10][11][12].

3.2 Comparação sintética das tecnologias de medição de nível

A Tabela 4 apresenta uma comparação sintética entre tecnologias utilizadas ou correlatas ao monitoramento de nível em barragens, resumindo atributos de aplicação, pontos fortes e limitações. O objetivo é explicitar que a seleção do sensor no ensaio de bancada não invalida a aderência da abordagem a outras tecnologias de campo, desde que a grandeza monitorada permaneça funcionalmente equivalente [10][11][12][14].

Tabela 4 – Comparação sintética entre tecnologias de medição de nível aplicáveis ao monitoramento.

Tecnologia	Aplicação típica	Pontos fortes	Limitações
Piezômetro / pressão	Estado hidráulico interno e carga piezométrica	Alta aderência geotécnica; integração com *data logger*	Instalação e manutenção mais complexas
Ultrassônico	Nível da superfície livre sem contato	Instalação simples; boa repetibilidade; 4–20 mA	Sensível a névoa, espuma e alinhamento
Radar	Nível da superfície livre em ambiente severo	Maior imunidade ambiental; maior alcance	Maior custo e necessidade de comissionamento
Capacitivo	Aplicações específicas com interface próxima ao sensor	Resposta rápida e boa sensibilidade	Exige calibração e é sensível a *fouling*

Fonte: elaboração própria.

3.1 TIC/IoT como camada de integração (contexto)

Tecnologias de informação e comunicação (TIC) e IoT podem apoiar o monitoramento ao viabilizar conectividade, consolidação e acesso remoto a dados. Entretanto, em aplicações críticas é comum realizar parte do processamento localmente (*edge*), reduzindo a dependência de conectividade contínua e aumentando a robustez operacional [7][8]. Neste artigo, o IoT é tratado como uma possibilidade de integração futura; a contribuição experimental concentra-se na aquisição local e no cálculo online da derivada temporal do nível.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Dados históricos

Foram analisados dados históricos de instrumentos de nível ao longo de aproximadamente três anos, com amostragem horária, visando caracterizar o regime normal de variação e obter estatísticas descritivas (mínimo, mediana e máximo). A seleção dos instrumentos priorizou completude de registros e estabilidade de medição, reduzindo suscetibilidade a *outliers* [5][12].

A construção dessa linha de base é uma etapa crítica em qualquer proposta de monitoramento orientada por variáveis derivadas, pois permite quantificar a amplitude das flutuações ordinárias e diferenciar respostas associadas à operação normal das compatíveis com alterações abruptas de regime. No presente estudo, a seleção dos instrumentos privilegiou séries com maior completude e estabilidade, reduzindo o peso das medições espúrias no cálculo estatístico [5][12].

A série histórica horária não é adequada para detectar ou reconstruir variações rápidas em escala de minutos; ela serve para caracterizar o envelope do regime normal e sua variabilidade. A velocidade de 6,0 cm/min é usada apenas como referência de ordem de grandeza para eventos severos, não como capacidade de detecção com a instrumentação/telemetria histórica disponível.

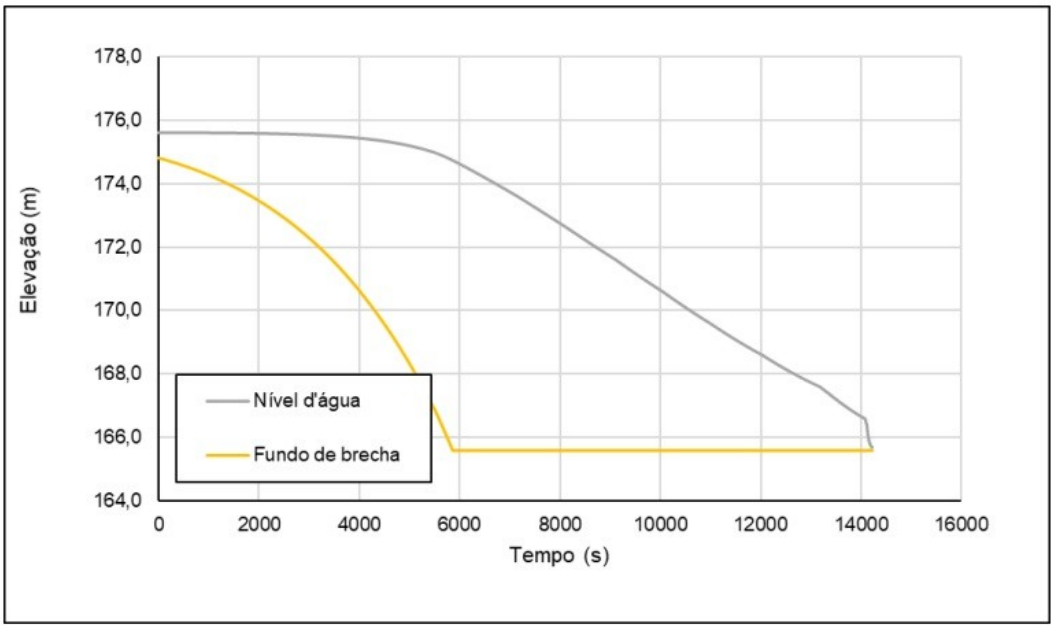
4.2 Referência conceitual de ordem de grandeza

Para contextualização conceitual, foi analisado um estudo técnico de ruptura hipotética por galgamento, do qual se obteve uma ordem de grandeza da velocidade de queda do nível associada a regime de escoamento não controlado. A partir de pontos de nível e de tempo, calculou-se uma velocidade de referência de 6,0 cm/min, utilizada neste trabalho como parâmetro de comparação conceitual, e não como meta experimental [13]. A Figura 1 apresenta a evolução temporal do nível extraída do estudo de referência, evidenciando a transição para regime de escoamento não controlado e sustentando a ordem de grandeza adotada para comparação com os dados históricos.

Do ponto de vista metodológico, a ordem de grandeza obtida no estudo de referência não é utilizada como limiar operacional definitivo para campo, mas como parâmetro externo de comparação. Essa distinção é importante para evitar que a PoC experimental seja interpretada como validação hidráulica de ruptura em escala real, quando, na realidade, sua finalidade é validar a instrumentação, o registro contínuo e a lógica de cálculo da derivada temporal [12] [13].

Ressalta-se que a velocidade de referência de 6,0 cm/min não representa uma taxa esperada de resposta dos piezômetros analisados neste trabalho. Em barragens reais, especialmente em maciços de terra com sistemas internos de drenagem, a resposta hidráulica observada nos piezômetros depende de fatores como permeabilidade dos materiais, heterogeneidade geológica, infiltração, trajetória dos fluxos internos e eficiência do sistema de drenagem. Consequentemente, a taxa de variação do nível do reservatório não deve ser interpretada como diretamente proporcional ou equivalente à taxa de variação observada nos instrumentos piezométricos [1][4][12].

Do ponto de vista de processamento de sinais, séries com amostragem horária não atendem aos requisitos de resolução temporal para reconstruir variações abruptas na escala de minutos, podendo ocorrer subamostragem e aliasing. Assim, a comparação com a velocidade de



referência (6,0 cm/min) deve ser interpretada como ordem de grandeza conceitual, e não como evidência de detectabilidade com telemetria horária.

Figura 1 – Elevação do nível d’água ao longo do tempo em estudo de rompimento de referência. Fonte: adaptado de [13].

4.3 Delimitação metodológica do estudo

O presente trabalho está estruturado sobre três conjuntos independentes de informações: (i) dados históricos dos instrumentos PZ04, PZ06 e PZ07, utilizados para caracterizar o comportamento típico em regime operacional normal; (ii) um estudo externo de ruptura hipotética, empregado exclusivamente para contextualização conceitual de ordens de grandeza associadas a variações rápidas de nível; e (iii) uma Prova de Conceito (PoC) experimental em tanque destinada à validação da cadeia de aquisição, filtragem e cálculo online da derivada temporal do nível.

Esses três elementos são complementares na construção da argumentação técnica do trabalho, porém são metodologicamente independentes. Não existe, nem se pretende estabelecer, relação hidráulica, física ou de simulação entre os dados históricos dos piezômetros, o estudo de ruptura hipotética e o ensaio realizado em tanque.

Os dados históricos foram utilizados para caracterização estatística de leituras reais em regime normal. O estudo de ruptura fornece apenas uma referência externa de ordem de grandeza. A PoC experimental foi desenvolvida exclusivamente para validar a instrumentação, a aquisição dos dados e os algoritmos de processamento. Dessa forma, a conexão entre os três blocos do estudo é conceitual e metodológica, e não uma tentativa de reproduzir ou simular o comportamento hidráulico de uma barragem real [12][13][14].

4.4 Prova de Conceito (PoC) em escala reduzida

A PoC foi conduzida em tanque de laboratório, com sensor de nível ultrassônico com saída de 4–20 mA. O sinal foi convertido por um resistor *shunt* e lido por um microcontrolador (ADC), com transmissão serial para o software em Python. O processamento em Python atua

como *data logger*, realizando a filtragem por mediana em janelas temporais e o cálculo *online* da derivada temporal do nível (cm/min). [2][11][14]

4.5 Justificativa para a escolha do sensor no ensaio de bancada

Embora os dados históricos analisados neste trabalho tenham sido obtidos a partir de piezômetros e sensores de pressão instalados em barragens reais, o ensaio experimental em escala reduzida adotou um sensor de nível ultrassônico para a Prova de Conceito (PoC). Essa escolha está associada a critérios práticos, metodológicos e de robustez experimental, e não a uma limitação conceitual da abordagem.

Sensores ultrassônicos apresentam como principais vantagens a medição sem contato com o fluido, a facilidade de instalação em ambiente controlado e a redução de efeitos associados a corrosão, incrustação e manutenção, aspectos relevantes para ensaios repetitivos em laboratório [11][14]. Além disso, a disponibilidade de modelos com saída analógica industrial padronizada (4–20 mA) permite a integração direta com sistemas de aquisição tipicamente empregados em aplicações industriais e de monitoramento de barragens.

Do ponto de vista da variável de interesse, a tecnologia de medição do nível é secundária, desde que o sensor forneça um sinal contínuo, confiável e com resolução temporal adequada. A variável analisada neste trabalho é a derivada temporal do nível d'água, e não o nível absoluto em si. Assim, o mesmo algoritmo de aquisição, filtragem estatística e cálculo *online* da velocidade de variação pode ser aplicado a sinais provenientes de sensores de pressão ou de piezômetros utilizados em campo, desde que haja equivalência funcional entre a grandeza medida e o nível do reservatório.

Dessa forma, o ensaio de bancada com sensor ultrassônico deve ser interpretado como validação da cadeia de instrumentação e processamento, e não como substituição dos instrumentos tradicionalmente empregados em barragens. A PoC demonstrou que a arquitetura proposta é capaz de registrar o nível, mitigar ruídos por meio de filtragem por mediana e calcular a derivada temporal em tempo de execução, fornecendo uma base técnica transferível para aplicações em ambiente real [2][11][14].

5. RESULTADOS

5.1 Estatística dos dados históricos

A Tabela 1 apresenta um resumo estatístico das velocidades de variação do nível (cm/min) estimadas a partir dos registros históricos. Observa-se que, em regime normal, as medianas permanecem próximas de zero e os máximos observados ficam muito abaixo da ordem de grandeza de referência [5][12].

Os instrumentos PZ04, PZ06 e PZ07 foram utilizados exclusivamente para caracterizar o comportamento histórico das leituras em regime operacional normal. A comparação com a ordem de grandeza de 6,0 cm/min deve ser entendida apenas como contextualização numérica, não representando comparação entre fenômenos fisicamente equivalentes nem correlação hidráulica direta entre o reservatório e a resposta piezométrica observada nos instrumentos [12][13].

A interpretação desses resultados deve considerar que os registros históricos provenientes do monitoramento de barragens reais instrumentadas, utilizados como base de referência estatística neste estudo, possuem amostragem horária, o que tende a suavizar eventos transitórios de curta duração. Esses registros correspondem a séries históricas obtidas em regime operacional normal e são empregados exclusivamente para a caracterização do envelope típico de variação do nível. Ainda assim, mesmo sob essa condição de amostragem, os máximos observados

permanecem significativamente inferiores à ordem de grandeza de referência, reforçando a separação entre o comportamento operacional esperado e situações de variação abrupta [5] [12].

Tabela 1 – Sumário estatístico das velocidades de variação do nível em regime normal (período de 3 anos).

Sensor	Nível			Velocidade de variação (cm/min)		
	Min	Mediana	Max	Min	Mediana	Max
PZ04	165,699	165,916	166,311	-0,096	0,001	0,079
PZ06	166,167	166,37	167,123	-0,037	0,001	0,064
PZ07	168,608	168,678	168,992	-0,030	-0,001	0,168

Fonte: elaboração própria.

5.2 Resultados da PoC em tanque

Nos ensaios controlados em tanque, a abertura de um e de dois drenos produziu cenários de descarga distintos. A velocidade de variação do nível aumentou proporcionalmente com a intensificação do escoamento, atingindo aproximadamente 3,15 cm/min no limite físico do sistema reduzido. Esse valor reflete a capacidade hidráulica do tanque e não representa limitação do método [11][14].

Quando se comparam as condições com um e dois drenos, observa-se comportamento coerente da variável derivada: o aumento da descarga produz maior depleção do nível e, consequentemente, maior magnitude da velocidade calculada. Tal resposta monotônica é particularmente importante para validar a sensibilidade da arquitetura em ambiente controlado, pois demonstra que a combinação sensor–aquisição–processamento responde de forma coerente às diferentes condições de drenagem impostas ao tanque experimental [11][14].

Entretanto, os resultados da PoC não devem ser interpretados como simulação hidráulica de barragens, reprodução de processos de percolação em maciços ou representação física de cenários de ruptura. O objetivo do ensaio é exclusivamente validar a aquisição dos dados, a filtragem estatística e o cálculo online da derivada temporal do nível, em condições controladas de laboratório [11][14].

Embora o sistema reduzido não reproduza a ordem de grandeza do estudo de referência, a utilidade da PoC reside justamente na verificação da robustez algorítmica e instrumental: a derivada é calculada em tempo de execução, com filtragem estatística para mitigar o ruído e

preservar a tendência central, permitindo rastrear o comportamento do ensaio e comparar cenários de descarga com baixa ambiguidade [11][14].

O ensaio em tanque foi estruturado a partir de diferentes cenários experimentais, definidos com base no perfil temporal da variação do nível d'água, de modo a representar situações distintas relevantes para a prova de conceito. Cada cenário corresponde a uma condição controlada de operação do sistema considerando variações lentas (1 dreno) e eventos transientes de maior velocidade de variação (2 drenos), conforme resumido na Tabela 2.

Tabela 2 – Resumo do nível e da velocidade de variação no ensaio em tanque.

Cenário	Início / Fim	Nível Min (cm)	Nível Mediana (cm)	Nível Max (cm)	Var. Mediana (cm)	Var. Max (cm/min)
1 dreno	14/01/2026 14:31:00 14:51:59	44,82	51,23	74,00	5,56	0,92
2 drenos	14/01/2026 14:52:00 15:06:59	20,93	30,60	44,80	2,365	3,15

A metodologia do ensaio em laboratório é descrita a seguir com apoio das Figuras 2 a 5, que apresentam o arranjo experimental, os elementos do sistema de medição e as etapas de aquisição e processamento do sinal. Essas figuras são fundamentais para a compreensão da lógica do ensaio e da construção dos cenários analisados

A Figura 2 apresenta o arranjo geral da bancada experimental utilizada no ensaio de laboratório, destacando o reservatório, o sensor de nível, a régua de nível nas laterais do tanque e os limites geométricos considerados.

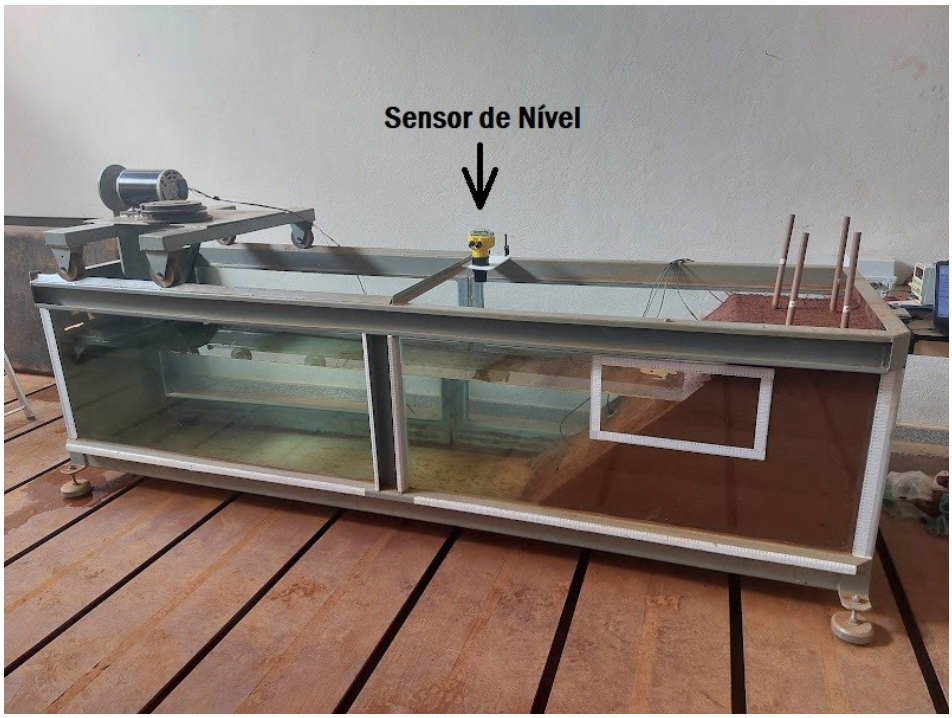


Figura 2 – Tanque de ensaio utilizado na Prova de Conceito (PoC). Fonte: elaboração própria.

A Figura 3 ilustra o diagrama de interligação entre a fonte de energia, sensor 4–20 mA e o microcontrolador para aquisição de dados..

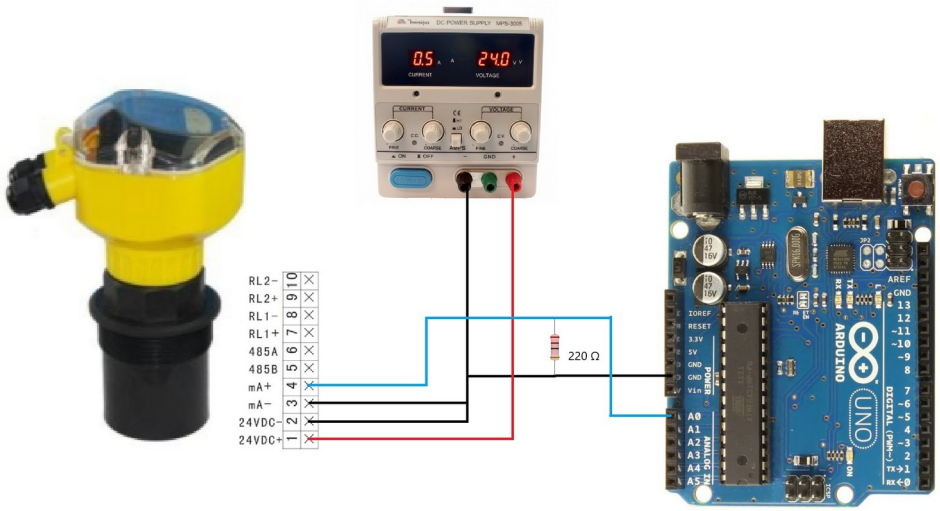


Figura 3 – Diagrama de interligação. Fonte: elaboração própria.

A Figura 4 apresenta o gráfico do nível (cm) e velocidade de variação do nível (cm/min) considerando o cenário com variação lenta, ou seja, 1 dreno aberto.

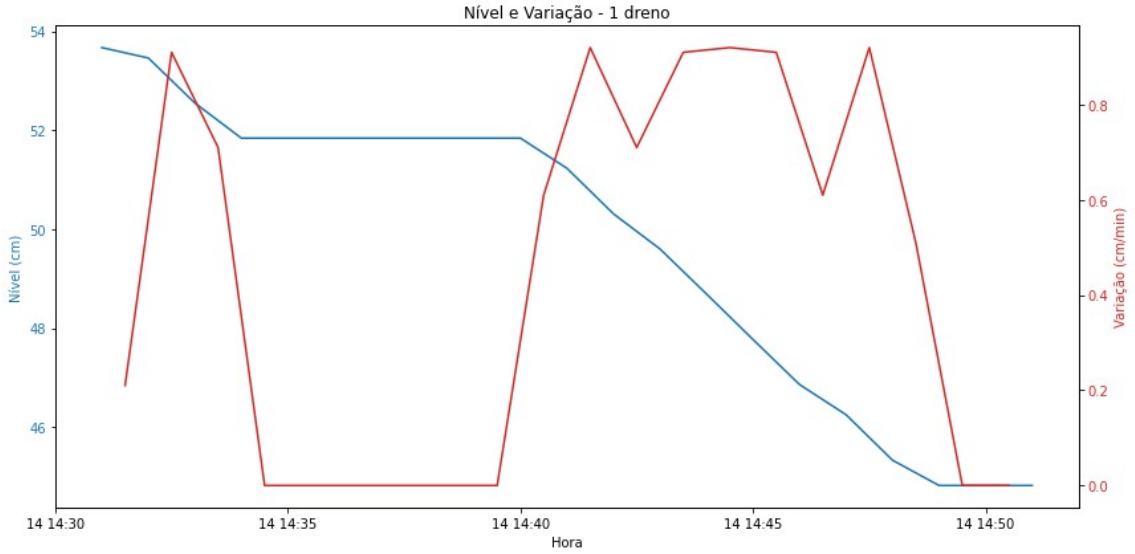


Figura 4 – Nível e velocidade de variação do nível cenário com 1 dreno. Fonte: elaboração própria.

A Figura 5 apresenta o gráfico do nível (cm) e velocidade de variação do nível (cm/min) considerando o cenário eventos transientes de maior velocidade de variação, ou seja, 2 drenos abertos.

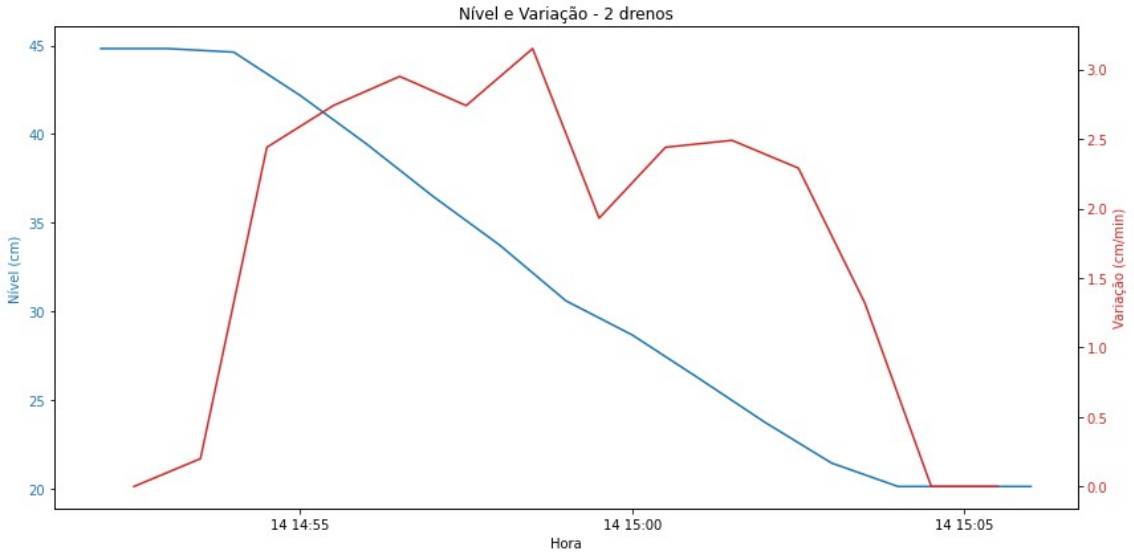


Figura 5 – Nível e velocidade de variação do nível cenário com 2 drenos. Fonte: elaboração própria

5.3 Arquitetura e algoritmos (visão funcional)

A lógica metodológica avaliada neste estudo baseia-se na análise contínua das velocidades de variação do nível d'água, com o objetivo de diferenciar o comportamento operacional típico de eventos transientes caracterizados por variações abruptas. O procedimento envolve a aquisição do sinal de nível, o processamento temporal dos dados e sua comparação com um baseline estatístico previamente definido.

A Tabela 3 resume o fluxo de dados do sistema, destacando as etapas de aquisição e processamento. A filtragem por mediana e o cálculo *online* da derivada permitem reduzir influência de ruídos e leituras espúrias, conforme discutido na literatura de instrumentação e processamento de sinais [14][5].

Tabela 3 – Fluxo de dados do sistema na Prova de Conceito.

Etapa	**Entrada**	**Saída**
Microcontrolador	Sinal 4–20 mA (convertido em V)	Pacotes via serial (CSV)
Python (Coleta)	Serial	Arquivo CSV com timestamps
Python (Análise)	Arquivo CSV	Gráficos e estatísticas

Fonte: elaboração própria.

No microcontrolador, a média de leituras atua como etapa preliminar de suavização do sinal analógico, reduzindo ruído elétrico antes da conversão para unidades de engenharia. Em seguida, no software em Python, a consolidação por janelas temporais e o uso da mediana evitam que valores aberrantes dominem o cálculo da derivada, estratégia compatível com a necessidade de robustez em cadeias de aquisição sujeitas a perturbações pontuais [11][14].

Essa separação em etapas — aquisição, registro e análise — favorece rastreabilidade, auditoria e reprocessamento dos dados, além de permitir substituição da tecnologia de

medição sem alteração substancial da lógica de cálculo. Em aplicações futuras, a mesma arquitetura pode ser implementada em *data loggers* industriais ou em plataformas supervisórias com processamento na borda, preservando o princípio metodológico demonstrado na PoC [12][14].

Com base nessa arquitetura de processamento, as velocidades de variação obtidas são comparadas às faixas estatísticas do baseline operacional. Valores compatíveis com esse envelope são classificados como comportamento normal, enquanto desvios significativos indicam eventos transientes, constituindo o critério central da lógica de detecção avaliada.

6. DISCUSSÃO

Os resultados evidenciam separação clara entre o regime normal observado em dados históricos e variações rápidas associadas a cenários extremos de escoamento. Essa separação sugere baixo risco de falsas interpretações quando a variável derivada é utilizada como subsídio de monitoramento. É fundamental, contudo, distinguir entre: (i) a ordem de grandeza de referência obtida em estudo hipotético em escala real e (ii) a validação experimental em escala reduzida, cuja finalidade é verificar a cadeia de instrumentação e o processamento *online*. Limitações de escala (geometria e capacidade de descarga) restringem a velocidade máxima observável no tanque, mas não invalidam a aplicabilidade do método em campo. Recomenda-se, para aplicações reais, redundância de sensores e integração com variáveis geotécnicas (pressão de poros, deslocamentos) e critérios de decisão com histerese para maior robustez [8][10][12].

A interpretação desses resultados deve considerar que não existe relação direta entre a taxa de variação do nível do reservatório e a resposta observada nos piezômetros. Em barragens reais, a resposta hidráulica medida nesses instrumentos depende de propriedades do maciço, incluindo permeabilidade, infiltração, heterogeneidade dos materiais, geometria dos fluxos internos e eficiência dos sistemas de drenagem. Dessa forma, as velocidades observadas nos instrumentos PZ04, PZ06 e PZ07 representam a resposta hidráulica local dos instrumentos monitorados e não uma representação direta da dinâmica global do reservatório [1][4][12].

Do ponto de vista de implantação, a principal contribuição do estudo reside menos na proposição de um limiar universal e mais na demonstração de um procedimento tecnicamente justificável: construir a linha de base com dados históricos, contextualizar ordens de grandeza a partir de referência externa e validar experimentalmente a cadeia de aquisição e processamento. Esse encadeamento é particularmente útil em programas de instrumentação que necessitam justificar a incorporação gradual de variáveis auxiliares antes de vinculá-las a critérios operacionais [5][12].

Além disso, a interpretação integrada entre nível, pressão de poros e deslocamentos tende a reduzir a ambiguidade diagnóstica e aumentar a resiliência do sistema. Em estruturas geotécnicas complexas, a complementaridade entre variáveis e tecnologias deve ser entendida como princípio de robustez, e não como redundância excessiva, especialmente quando o objetivo é aumentar a confiabilidade sem perder a rastreabilidade dos critérios de decisão [8][10][12].

7. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma abordagem baseada na variação do nível d’água e em sua derivada temporal como variável auxiliar para o monitoramento da segurança de barragens, combinando dados históricos, contextualização conceitual e Prova de Conceito (PoC) experimental. A análise histórica demonstrou que velocidade de variação em regime normal permanecem próximas de zero e significativamente inferiores a ordens de grandeza associadas a regimes extremos. A PoC validou a cadeia de instrumentação com sensor de saída 4–20 mA, microcontrolador e software em Python, demonstrando aquisição, filtragem e cálculo *online* da velocidade de variação do nível em condições controladas. Como trabalhos futuros, recomenda-se avaliação em campo com *data loggers* industriais e integração a arquiteturas de comunicação (incluindo IoT) quando aplicável, além de ensaios com múltiplos sensores e validações cruzadas [11][12][14].

Em síntese, a contribuição do trabalho está na consolidação de uma metodologia replicável para introdução de variáveis derivadas em programas de monitoramento: definir linha de base histórica, contextualizar ordens de grandeza com suporte técnico e validar experimentalmente a instrumentação e o processamento em ambiente controlado. Tal metodologia é compatível com a evolução incremental de sistemas instrumentados em barragens e estruturas geotécnicas, preservando coerência entre análise, implementação e futuras ampliações de escopo [5][8][12].

Por fim, ressalta-se que não existe, nem se pretende estabelecer, qualquer relação hidráulica, física ou de simulação entre os dados históricos dos piezômetros, o estudo de ruptura hipotética utilizado como referência conceitual e a Prova de Conceito realizada em tanque. Os três elementos foram empregados com finalidades distintas e complementares: caracterização estatística do regime operacional normal, contextualização de ordens de grandeza e validação da cadeia de instrumentação e processamento, respectivamente [12][13][14].

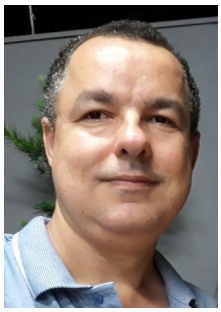
PALAVRAS-CHAVE

Segurança de barragens; instrumentação; aquisição de dados; variação do nível; prova de conceito; processamento em tempo real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G.. Soil Mechanics in Engineering Practice. 3. ed. New York: Wiley, 1996.
[2] SCAIONI, M.; MARSELLA, M.; CROSETTO, M.; et al.. Geodetic and remote-sensing sensors for dam deformation monitoring. Sensors, v. 18, n. 11, p. 3682, 2018.
[3] LAURIANO, A. W.; ÁVILA, J. P.; CORTEZ, J.; et al.. Discussões sobre os modos de falha e risco de galgamento de barragens de rejeitos. In: II Seminário Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeito, 2017.
[4] OKEKE, A. C. U.; WANG, F.. Hydromechanical constraints on piping failure of landslide dams: an experimental investigation. Geoenvironmental Disasters, v. 3, n. 1, 2016.
[5] CHEN, A.; TANG, X.; HE, J.. New method for measuring diagnosis indexes based on concept lattices in dam health diagnosis. IEEE Access, v. 12, p. 22490–22499, 2024.

[6] COSTA, R. A.. Sistema de monitoramento de reservatórios de água com abordagem e conceito de Internet das Coisas (IoT). Formiga: IFMG, 2019.
[7] RIBEIRO, F. T.. Internet das coisas: da teoria à prática. 2019.
[8] MARQUES, J. L. N.. Plano de Emergência Interno de Barragens. Dissertação (Mestrado). Universidade NOVA de Lisboa, 2015.
[9] ADAMO, N.; AL-ANSARI, N.; SISSAKIAN, V.; et al.. Dam Safety: use of seismic monitoring instrumentation in dams. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, v. 11, n. 1, p. 203–247, 2021.
[10] CAMPOS, R. L.; DE PAULA, A. Q.; PEDROSA, M. H.; et al.. Estado da Arte em Monitoramento Geotécnico de Deslocamento para Barragens e Estruturas de Mineração. 2018.
[11] OLIVEIRA NETO, P. A. D.. A aplicação de sensor de pressão para a medição de nível de líquidos em reservatórios. Trabalho de Conclusão (Graduação). UFRN, 2023.
[12] VALE. Projeto Básico – FEL2, Barragens, AAS Medição de Nível. Relatório Técnico MD-1850DD-J-00000, Vale, 2023.
[13] WALM ENGENHARIA. Estudo de Ruptura Hipotética de Barragem. Relatório Técnico RL-9003SA-X-00062, Vale S.A., jan. 2024.
[14] WOLF, A.. Assessing fill level with ultrasonic sensors. Sensor Journal, v. 23, n. 6, p. 470–482, 2020.



André Luis Paiva Carrara é Engenheiro de Controle e Automação, Eletricista e de Produção, com mais de 20 anos de experiência em automação, instrumentação, confiabilidade, gestão de projetos e tecnologia aplicada à mineração, óleo e gás e indústria. Atua na Vale com engenharia para automação de mina, usina e estruturas geotécnicas.



Laryssa Aparecida Gomes Fagundes possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Federal de Ouro Preto (2026), Técnico Integrado em Automação Industrial pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (2020) e pela Escola Estadual Marília de Dirceu (2016).



Gustavo Pessin é Doutor em Ciências da Computação (USP) com sanduíche na Heriot-Watt University e pós-doutorado no MIT. Pesquisador no Instituto Tecnológico Vale, membro de programas de pós-graduação em Instrumentação, Controle e Automação (EM-UFOP/ITV) e Tecnologias Inovadoras na Mineração (Unifesspa/ITV). Professor Colaborador do PPG-CC da UFPA. Pesquisa em aprendizado de máquina, instrumentos inteligentes e robótica móvel.



Alan Kardek Rêgo Segundo é Engenheiro de Controle e Automação (UFOP), Mestre e Doutor em Engenharia Agrícola (UFV). Coordenou a criação do PROFICAM (UFOP-ITV). Cofundador das startups Épsilon Automação (primeira spin-off da UFOP) e MineDebug. Possui patentes licenciadas publicadas no DOU. Foi finalista do Prêmio Jabuti Acadêmico 2025. Atua em automação, sistemas embarcados e inovação para mineração e agricultura.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.4
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

MODERNIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS NA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ: ABORDAGEM HÍBRIDA PARA MONITORAMENTO PREDITIVO

TÍTULO DO ARTIGO

Danielle FRANCO
Engenheira Civil, Especialista SST - AXIA / UFPA
Cleomar MELO
Engenheiro Florestal, Especialista SST- AXIA/UFPA
Rosângela PINTO
Engenheira Civil, M. Sc - UFPA
Eden MORAIS
Engenheiro Florestal, Especialista SST- AXIA/UFPA
Andre NOGUEIRA
Engenheira Civil, M. Sc – AXIA/UFPA

RESUMO

A segurança de barragens constitui tema de máxima relevância estratégica no cenário da geração hidrelétrica brasileira, cuja matriz energética depende em proporção significativa de usinas a fio d'água e de reservatório. A Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHE Tucuruí), localizada no rio Tocantins, estado do Pará, com capacidade instalada de 8.370 MW, opera com sistema de instrumentação civil predominantemente analógico, caracterizado por leituras manuais periódicas e baixa frequência de aquisição de dados. As limitações metrológicas e a reduzida resolução temporal desse sistema comprometem a capacidade de detecção precoce de anomalias estruturais. Este trabalho propõe uma arquitetura tecnológica híbrida para a modernização gradual do referido sistema, fundamentada na estratégia de retrofit e na integração de sensores digitais, redes de comunicação LPWAN com tecnologia LoRa, backbone em fibra óptica monitorado por OTDR, sistemas SCADA e software SYSDAM, com apoio de algoritmos de machine

learning para monitoramento preditivo. Os instrumentos propostos incluem piezômetros piezorresistivos, inclinômetros baseados em tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), extensômetros de fibra óptica do tipo FBG (Fiber Bragg Grating) e sismógrafos estruturais. A solução é modular, escalável e alinhada à Lei nº 12.334/2010 e às diretrizes regulatórias da ANEEL e da ANA, contribuindo para o fortalecimento da gestão de segurança de barragens no Sistema Interligado Nacional.

ABSTRACT

Dam safety is a matter of paramount strategic importance in the Brazilian hydroelectric generation scenario, whose energy matrix relies significantly on run-of-river and reservoir power plants. The Tucuruí Hydroelectric Power Plant (UHE Tucuruí), located on the Tocantins River, state of Pará, with an installed capacity of 8,370 MW, currently operates with a predominantly analog civil instrumentation system characterized by periodic manual readings and low data acquisition frequency. The metrological limitations and reduced temporal resolution of this system undermine the early detection of structural anomalies. This paper proposes a hybrid technological architecture for the gradual modernization of the existing system, based on a retrofit strategy integrating digital sensors, LPWAN communication networks using LoRa technology, fiber optic backbone monitored by OTDR, SCADA systems and SYSDAM software, supported by machine learning algorithms for predictive monitoring. Proposed instruments include piezoresistive piezometers, MEMS-based inclinometers, FBG fiber optic extensometers, and structural seismographs. The solution is modular, scalable, and aligned with Brazilian Law No. 12,334/2010 and the regulatory guidelines of ANEEL and ANA, contributing to enhanced dam safety management across the National Interconnected System.

1 INTRODUÇÃO

A segurança de obras hidráulicas de grande porte figura entre as principais responsabilidades do setor energético brasileiro. Barragens são estruturas de elevada complexidade geotécnica e hidráulica cujas falhas podem gerar consequências catastróficas, tanto do ponto de vista humano quanto econômico e ambiental. Os eventos de ruptura de Fundão (2015) e Brumadinho (2019), embora relacionados à mineração, evidenciaram a necessidade inadiável de modernização dos sistemas de monitoramento estrutural em todo o país, incluindo o setor hidrelétrico [1].

A Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHE Tucuruí), maior usina hidrelétrica inteiramente nacional e a quarta maior do mundo em potência instalada, com 8.370 MW, representa um ativo estratégico insubstituível para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Localizada no rio Tocantins, estado do Pará, a usina acumula mais de quatro décadas

de operação contínua, período durante o qual seu sistema de instrumentação civil permaneceu baseado predominantemente em tecnologias analógicas [2].

O conjunto de instrumentos atualmente instalado compreende piezômetros, inclinômetros, extensômetros múltiplos, medidores de junta triortogonais, pêndulos diretos, medidores de recalque múltiplo e medidores de vazão, utilizados no monitoramento de pressões intersticiais, deslocamentos, deformações internas, assentamentos e vazões em sistemas de drenagem. Apesar de tecnicamente consolidado, esse arranjo apresenta limitações quanto à resolução temporal, precisão metrológica e capacidade de detecção precoce de anomalias estruturais, em especial diante dos avanços tecnológicos disponíveis [3].

Nesse contexto, a proposta apresentada neste trabalho visa preencher a lacuna existente entre o estado atual da instrumentação da UHE Tucuruí e as capacidades técnicas disponíveis em sensoriamento digital, comunicação sem fio de baixo consumo e inteligência computacional aplicada à engenharia de barragens. A abordagem fundamenta-se no conceito de retrofit tecnológico, priorizando a integração gradual de novas tecnologias à infraestrutura existente, com mínima intervenção operacional e máximo aproveitamento dos ativos instalados.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é apresentar e discutir uma arquitetura tecnológica híbrida para a modernização do sistema de instrumentação civil da UHE Tucuruí, com foco em automação, conectividade digital e monitoramento preditivo baseado em dados.

Os objetivos específicos são:

a) Caracterizar o sistema de instrumentação analógico existente e identificar suas limitações técnicas;

b) Descrever as tecnologias digitais propostas para substituição ou complementação dos instrumentos atuais;

c) Apresentar a arquitetura de comunicação, aquisição e processamento de dados proposta;

d) Avaliar a conformidade da solução com a Lei nº 12.334/2010 e as normas regulatórias vigentes;

e) Discutir o potencial de replicabilidade do modelo em outras barragens do SIN.

2 SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO EXISTENTE NA UHE TUCURUÍ

2.1 Caracterização dos Instrumentos Instalados

O sistema de instrumentação civil da UHE Tucuruí foi concebido e instalado durante a fase de construção da usina, nas décadas de 1970 e 1980, seguindo as práticas técnicas vigentes à época. O conjunto de instrumentos é constituído por elementos de medição passiva, cuja leitura demanda presença física de equipes técnicas em campo, com periodicidade semanal, quinzenal ou mensal, conforme o tipo de instrumento e a classificação de risco da seção monitorada [4].

Os piezômetros do tipo Casagrande e os piezômetros elétricos de corda vibrante são utilizados para monitoramento das pressões intersticiais e da posição da linha freática

nas fundações e aterros da barragem. Os inclinômetros de tubo, instalados em furos verticais e inclinados, registram os perfis de deslocamento horizontal ao longo da profundidade. Os extensômetros múltiplos de haste medem deslocamentos diferenciais verticais e horizontais em pontos específicos do maciço e das estruturas de concreto [2].

Os medidores de junta triortogonais registram movimentos relativos entre blocos de concreto nas três direções espaciais, sendo fundamentais para o controle de juntas de dilatação e de contato entre estruturas adjacentes. Os pêndulos diretos são utilizados no monitoramento de deslocamentos horizontais absolutos das estruturas de concreto, com leitura por coordenômetro óptico. Os medidores de recalque múltiplo e os medidores de vazão completam o conjunto, fornecendo informações sobre assentamentos diferenciais e sobre o regime de drenagem das fundações e dos corpos de barragem [3].

2.2 Limitações do Sistema Analógico Atual

A principal limitação do sistema existente reside na baixa frequência de aquisição de dados. Leituras manuais com periodicidade mensal, bimestral, trimestral e semestral são insuficientes para a detecção de eventos transitórios de rápida evolução, tais como variações bruscas de percolação, picos de pressão intersticial associados a cheias ou sismos, e movimentos diferenciais pontuais de curta duração [5].

A ausência de automação implica elevada dependência de recursos humanos e expõe as leituras a erros operacionais. A inexistência de sistemas de alarme automatizados em tempo real representa uma lacuna crítica sob a perspectiva da gestão proativa de riscos [1].

Do ponto de vista normativo, a Lei nº 12.334/2010 e as resoluções da ANEEL e da ANA estabelecem obrigatoriedade de implementação de Planos de Segurança de Barragens (PSB) e de sistemas de monitoramento e instrumentação compatíveis com a Categoria de Risco (CRI) e o Dano Potencial Associado (DPA) da estrutura. A UHE Tucuruí é classificada com Categoria de Risco Baixa (CRI), Dano Potencial Associado Alto (DPA) e Classe B, exigindo monitoramento contínuo, instrumentação adequada e inspeções periódicas para assegurar a integridade estrutural e a segurança da barragem. [6].

3 PROPOSTA DE MODERNIZAÇÃO: ARQUITETURA TECNOLÓGICA HÍBRIDA

3.1 Princípio do Retrofit Tecnológico

O conceito de retrofit, aplicado à instrumentação de barragens, consiste na atualização tecnológica do sistema de monitoramento existente por meio da adaptação ou substituição seletiva de componentes, com o objetivo de aprimorar o desempenho e a confiabilidade sem a necessidade de substituição integral da infraestrutura instalada. Essa abordagem minimiza custos, reduz o tempo de implantação e evita interrupções operacionais prolongadas, sendo especialmente adequada para obras em operação contínua [7].

A estratégia proposta adota caráter modular e escalonado, permitindo que a modernização seja implementada por fases, priorizando as seções da barragem de maior risco ou com instrumentação mais degradada. Cada módulo é independente e

pode ser comissionado e operacionalizado sem interferência nos demais, garantindo continuidade do monitoramento durante toda a transição tecnológica.

3.2 Sensores Digitais Propostos

Para o monitoramento de pressões intersticiais, propõe-se a substituição gradual dos piezômetros analógicos por piezômetros piezorresistivos ou de corda vibrante com saída digital, dotados de registradores internos e capacidade de comunicação via protocolo SDI-12 ou Modbus RTU. Esses instrumentos oferecem resolução de leitura da ordem de 0,01% do fundo de escala, com deriva anual inferior a 0,1%, compatível com as exigências de monitoramento de longo prazo em barragens [5].

Para o monitoramento de deslocamentos angulares e inclinações, propõe-se a implantação de inclinômetros baseados em tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), instalados em configurações in-place ao longo dos tubos guia existentes. Os sensores MEMS de alta resolução apresentam consumo energético inferior a 5 mA em modo ativo e inferior a 10 µA em modo sleep, tornando-os adequados para operação com alimentação solar ou por bateria em locais de difícil acesso [8].

Para a extensometria estrutural, propõe-se a incorporação de sensores de fibra óptica do tipo Fiber Bragg Grating (FBG), instalados em paralelo aos extensômetros de haste existentes ou embutidos em novas seções instrumentadas. Sensores FBG são imunes a interferências eletromagnéticas, apresentam multiplicação por comprimento de onda (WDM) de até 80 sensores por fibra e oferecem resolução de deformação da ordem de 1 µε, características que os tornam superiores aos extensômetros elétricos convencionais para aplicações de longo prazo [9].

Para o monitoramento de vibrações estruturais e eventos sísmicos, propõe-se a implantação de sismógrafos estruturais triaxiais com frequência de amostragem de até 200 Hz, integrados ao sistema de aquisição central. Esses instrumentos permitem o registro de eventos dinâmicos, a análise modal operacional da estrutura e a identificação de variações nas frequências naturais que possam indicar mudanças no comportamento estrutural [3].

3.3 Infraestrutura de Comunicação: Redes LPWAN e LoRa

A transmissão de dados entre os sensores de campo e o centro de controle é realizada por meio de redes Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) com tecnologia LoRa (Long Range), associadas a um backbone em fibra óptica monomodo monitorado por sistemas Optical Time-Domain Reflectometer (OTDR). A tecnologia LoRa opera nas bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical), com alcance de até 15 km em ambientes abertos e consumo energético extremamente reduzido, compatível com alimentação solar e operação autônoma prolongada [10].

A arquitetura de rede adota topologia estrela estendida, com gateways LoRaWAN posicionados estrategicamente ao longo do corpo da barragem e nas ombreiras, cobrindo todas as seções instrumentadas. Os gateways são interligados ao centro de controle por fibra óptica, garantindo largura de banda suficiente para transmissão em tempo real dos dados de todos os instrumentos instalados. O monitoramento contínuo da fibra por OTDR permite a detecção de quebras, dobras ou degradações com localização precisa ao longo do percurso [7].

3.4 Aquisição de Dados: Data Loggers, SCADA e SYSDAM

A aquisição e o pré-processamento local dos dados são executados por data loggers industriais de grau de proteção IP67, instalados em abrigos climatizados distribuídos ao longo da crista e das ombreiras da barragem. Esses dispositivos realizam varredura multicanal com frequência configurável de 1 Hz a 0,001 Hz, armazenam dados localmente em memória não volátil de até 8 GB e transmitem os registros ao servidor central via protocolo MQTT sobre rede LoRaWAN ou fibra óptica [4].

No nível de supervisão, os dados são integrados a sistemas Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), que permitem a visualização em tempo real de todos os parâmetros monitorados, a geração automática de relatórios periódicos e o disparo de alarmes configuráveis por limites de atenção, alerta e emergência. O software SYSDAM, desenvolvido especificamente para gestão de segurança de barragens no contexto brasileiro, atua como camada de gestão documental e de conformidade normativa, integrando os dados de campo às exigências de relatório dos órgãos reguladores [6].

3.5 Machine Learning para Detecção de Anomalias e Análise Preditiva

A aplicação de técnicas de *Machine Learning* no monitoramento de barragens permite transformar grandes volumes de dados instrumentais em informações relevantes para a avaliação contínua do comportamento estrutural. Nesse contexto, algoritmos são treinados a partir do histórico de leituras dos instrumentos instalados, possibilitando a identificação de padrões de operação considerados normais e a detecção de desvios associados a possíveis condições de anomalia.

Entre as abordagens empregadas, destacam-se os modelos baseados em redes neurais recorrentes do tipo *Long Short-Term* Memory (LSTM), aplicados a séries temporais provenientes dos instrumentos de monitoramento. Esses modelos permitem reconhecer variações sutis no comportamento dos dados, correlacionando-os com variáveis operacionais e ambientais, como nível do reservatório, temperatura e precipitação acumulada, o que contribui para a identificação precoce de alterações relevantes no sistema. A partir da automatização dos processos de aquisição e tratamento dos dados, essas análises passam a ser executadas de forma contínua, viabilizando a geração de alertas em tempo quase real e o aprimoramento progressivo da precisão preditiva dos modelos à medida que novos dados são incorporados[11].

Complementarmente, são utilizados modelos de regressão multivariada e algoritmos baseados em *Random Forest* para investigar relações complexas entre variáveis hidrometeorológicas e respostas estruturais observadas nos instrumentos. Essa abordagem possibilita a definição de referências estatísticas de comportamento, representadas por curvas envoltórias, além da identificação de tendências de longo prazo que podem indicar processos iniciais de degradação da estrutura. Em ambiente operacional, a integração desses modelos ao sistema automatizado contribui para a atualização contínua das análises, reduz a dependência de intervenções manuais e fortalece o suporte técnico à tomada de decisão no âmbito da segurança da barragem [12]

O fluxo de processamento dos dados compreende etapas estruturadas de pré-processamento, incluindo filtragem, tratamento de valores ausentes e normalização, seguidas pela extração de atributos relevantes, treinamento supervisionado e não

supervisionado, validação cruzada e implementação em ambiente operacional com atualização incremental dos modelos. A infraestrutura computacional é baseada em arquitetura de *edge computing*, com servidores instalados localmente no centro de controle da usina, o que garante autonomia operacional e independência de conectividade externa para o funcionamento do sistema de monitoramento e alarme. Essa configuração assegura a operação contínua dos modelos de *Machine Learning*, aumentando a confiabilidade das previsões, reduzindo o tempo de resposta a eventos anômalos e fortalecendo a gestão preditiva e preventiva da segurança da barragem[8].

4 ESTRATÉGIA DE IMPLANTAÇÃO

4.1 Modularidade e Escalabilidade

A implantação da arquitetura híbrida proposta segue um plano faseado em três etapas. Na primeira etapa, denominada Fase Piloto, são instrumentadas as seções de maior relevância da barragem principal, com instalação dos data loggers, da rede LoRaWAN e dos primeiros módulos de sensores digitais. Essa fase tem duração estimada de 12 meses e serve como validação técnica e operacional do conceito proposto.

Na segunda etapa, a arquitetura é expandida para todas as seções da barragem principal e para as estruturas adjacentes (vertedouro, tomadas d'água e canais de adução). Na terceira etapa, o sistema é estendido às ombreiras e às estruturas auxiliares, completando a cobertura integral do complexo. O caráter modular garante que cada fase seja independente e que eventual necessidade de revisão ou substituição de componentes não comprometa o funcionamento dos módulos já implantados.

4.2 Conformidade Normativa e Regulatória

A arquitetura proposta é integralmente compatível com as exigências da Lei nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), e com as Resoluções ANEEL nº 875/2020 e ANA nº 91/2012, que regulamentam os critérios mínimos de instrumentação e monitoramento para barragens de uso hidrelétrico e de acumulação de água, respectivamente [6].

O sistema SYSDAM, integrado à plataforma proposta, atende às exigências de registro, documentação e envio periódico de relatórios ao Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), mantido pela ANA. A rastreabilidade metrológica dos instrumentos digitais propostos é garantida por certificados de calibração emitidos por laboratórios acreditados pela Rede Brasileira de Calibração (RBC), em conformidade com a ABNT NBR ISO/IEC 17025 [6].

5 RESULTADOS ESPERADOS E DISCUSSÃO

A implantação da arquitetura híbrida proposta deve resultar em elevação substancial da resolução temporal das medições, passando de leituras semanais ou quinzenais para registros contínuos, com frequência mínima de uma leitura por hora e máxima de uma leitura por minuto. Essa mudança qualitativa amplia significativamente a janela de detecção de eventos transitórios, reduzindo o tempo entre a ocorrência de uma anomalia e o disparo do alerta correspondente.[5].

A substituição de leituras manuais por aquisição automática elimina erros operacionais associados à leitura humana, à transcrição de valores e à digitação em planilhas, fontes reconhecidas de inconsistência em bases de dados históricas de instrumentação. A automatização também libera recursos humanos especializados para atividades de maior valor agregado, como análise crítica dos dados e manutenção preventiva dos instrumentos [4].

A capacidade de detecção automática de anomalias pelos algoritmos de machine learning representa um salto qualitativo na gestão proativa de riscos. Estudos internacionais indicam que sistemas de monitoramento baseados em inteligência computacional são capazes de identificar anomalias estruturais com antecedência de dias a semanas em relação a sistemas convencionais de inspeção visual e leitura manual [11]. Essa antecedência é fundamental para a tomada de decisões preventivas e para a ativação de planos de ação emergencial com maior tempo disponível para intervenção.

O caráter replicável da arquitetura proposta constitui um benefício adicional de relevância sistêmica. A solução pode ser adaptada e implantada em outras barragens do parque hidrelétrico nacional, contribuindo para a modernização do setor como um todo e para o cumprimento das obrigações regulatórias de segurança de barragens em escala nacional. A padronização dos protocolos de comunicação e dos formatos de dados facilita ainda a integração futura com plataformas nacionais de gestão de riscos de barragens.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposta de modernização gradual do sistema de instrumentação civil da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, por meio de uma arquitetura tecnológica híbrida fundamentada no conceito de retrofit. A solução proposta integra sensores digitais de alta precisão, redes de comunicação LPWAN com tecnologia LoRa, sistemas SCADA e algoritmos de machine learning para monitoramento preditivo, em um arranjo modular, escalável e alinhado ao marco regulatório brasileiro de segurança de barragens.

A análise comparativa entre o sistema analógico existente e a arquitetura proposta demonstra ganhos expressivos em resolução temporal, precisão metrológica, automação operacional e capacidade de detecção precoce de anomalias. O caráter não intrusivo da implantação por retrofit minimiza riscos operacionais durante a transição tecnológica, preservando a continuidade do monitoramento ao longo de todo o processo.

Conclui-se que a arquitetura híbrida proposta representa uma contribuição técnica e científica relevante para o campo da instrumentação de barragens no Brasil, com potencial imediato de aplicação na UHE Tucuruí e perspectiva de replicação em outras usinas do Sistema Interligado Nacional. Recomenda-se, como próximos passos, a implantação de um projeto-piloto em seção representativa da barragem, a validação dos modelos de machine learning com dados reais e a elaboração de manual técnico de implantação para disseminação da metodologia no setor.

7 PALAVRAS-CHAVE

Retrofit tecnológico; Monitoramento preditivo; LoRa/LPWAN; Machine learning; Segurança de barragens.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CBDB – COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (2020) – Diretrizes para Segurança de Barragens Hidrelétricas, Publicação Técnica nº 23, Rio de Janeiro, Brasil.

[2] ELETRONORTE – CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. (2022) – Relatório Anual de Segurança de Barragens: UHE Tucuruí, Relatório Técnico RT-SB-2022, Brasília, Brasil.

[3] ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (2017) – Dam Safety Management: Operational Phase of the Dam Safety Process, Bulletin 154, Paris, França.

[4] SILVEIRA, J. F. A. (2003) – Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento, Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.

[5] DUNNICLIFF, J. (1993) – Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, John Wiley & Sons, Nova York, EUA.

[6] BRASIL (2010) – Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 – Política Nacional de Segurança de Barragens, Diário Oficial da União, Brasília, Brasil.

[7] BADO, M. F.; CASAS, J. R. (2021) – A Review of Recent Distributed Fiber Optic Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring, Sensors, v. 21, n. 5, p. 1818, MDPI, Suíça.

[8] POZZI, M.; DER KIUREGHIAN, A. (2011) – Assessing the Value of Information for Long-Term Structural Health Monitoring, Proceedings of SPIE, v. 7984, San Diego, EUA.

[9] KERSEY, A. D. et al. (1997) – Fiber Grating Sensors, Journal of Lightwave Technology, v. 15, n. 8, p. 1442–1463, IEEE, EUA.

[10] ADELANTADO, F. et al. (2017) – Understanding the Limits of LoRaWAN, IEEE Communications Magazine, v. 55, n. 9, p. 34–40, IEEE, EUA.

[11] MATA, J.; DE CASTRO, A. T.; SÁ DA COSTA, J. (2014) – Constructing Statistical Models for Arch Dam Deformation, Structural Control and Health Monitoring, v. 21, n. 3, p. 423–437, Wiley, EUA.

[12] SALAZAR, F. et al. (2015) – An Empirical Comparison of Machine Learning Techniques for Dam Behaviour Modelling, Structural Safety, v. 56, p. 9–17, Elsevier, Países Baixos.



Danielle FRANCO

Engenheira Civil, pela UFPA. Especialista em Engenharia e Segurança do Trabalho pela Faculdade Unopar. Especialista em Segurança de Barragens pela Faculdade Unyleya. Mestranda em Engenharia de Barragens e gestão Ambiental pela UFPA. Atua como especialista em segurança de barragens na AXIA há mais de 2 anos, com experiência em instrumentação, monitoramento e análise de risco de barragens hidrelétricas na região amazônica.



Cleomar MELO

Engenharia Florestal, pela UFPA, Graduando em Direito e Especialista em Engenharia e Segurança do Trabalho pela Faculdade Einstein. Mestrando em Engenharia de Barragens e gestão Ambiental pela UFPA. Tem experiência na área de Recursos Florestais e instrumentação, monitoramento e análise de risco de barragens hidrelétricas na região amazônica.



Rosângela PINTO

Engenheira Civil, Mestre e Doutoranda em Engenharia de Estruturas pela UFPA, Professora Substituta no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA). Graduanda em Direito e Especialista em Engenharia e Segurança do Trabalho pela Faculdade Einstein. Com experiência nas áreas de Concreto Armado, Estruturas Pré-moldadas, Reforço Estrutural e Estruturas de Usinas Hidrelétricas.



Eden Morais

Engenheiro Civil, pela UFPA. Especialista em Segurança de Barragens UFBA. Atua como engenheiro de gestão operacional em segurança de barragens na AXIA há mais de 18 anos, com experiência em instrumentação, monitoramento e análise de risco de barragens hidrelétricas na região amazônica.

	Andre Nogueira Engenheiro Civil pela UFMT, Mestre em estruturas pela UFPA. Especialista em Materiais de Construção. Com experiência em terraplanagem, pavimentação, controle de qualidade, fiscalização de grandes obras. Atua como Coordenador de segurança de barragens na AXIA há mais de 18 anos, com experiência em instrumentação, monitoramento e análise de risco de barragens hidrelétricas na região amazônica.

VI Simpósio sobre Instrumentação de Barragens e Estruturas Geotécnicas

MONITORAMENTO AUTOMATIZADO DE RECALQUES EM BARRAGENS POR PERFILADORES HIDROSTÁTICOS DISTRIBUÍDOS: ALTERNATIVA TÉCNICA ÀS CAIXAS SUECAS

Wilson Soares Junior
Diretor de Instrumentação e Tecnologia — G5 Engenharia

Douglas José Penteado Auer
Supervisor Comercial de Instrumentação — G5 Engenharia

RESUMO

O monitoramento de recalques verticais é essencial para avaliar o desempenho e a segurança de barragens de terra, enrocamento e rejeitos, sobretudo durante a construção, alteamento e início de operação. Tradicionalmente, esse controle é feito por medidores hidrostáticos por transbordamento — conhecidos como caixas suecas, overflow gages ou hydraulic leveling devices —, amplamente utilizados na prática geotécnica, mas associados à complexidade construtiva, dependência de procedimentos rigorosos e limitações para aquisição frequente e automatizada de dados. Este trabalho apresenta a aplicação do Automatic Settlement Profiler (ASP), tecnologia baseada no princípio hidrostático, voltada à aquisição automática, perfilamento distribuído e integração com sistemas digitais de monitoramento. São discutidos aspectos de projeto, instalação, desempenho metrológico, confiabilidade operacional e análise dos dados, destacando ganhos de resolução, frequência de leitura e rastreabilidade das séries temporais. O estudo reforça o potencial do ASP como alternativa robusta aos sistemas tradicionais, especialmente pelo ganho de resolução espacial da instrumentação distribuída, que transforma medições pontuais em um perfil contínuo ao longo da seção instrumentada.

ABSTRACT

Vertical settlement monitoring is one of the central elements for assessing the performance and safety of earth-fill, rockfill and tailings dams, particularly during the construction, raising and initial operation phases. Traditionally, this monitoring is performed using hydraulic overflow settlement gages — known in Brazil as caixas suecas and in international literature as overflow gages or hydraulic leveling devices —, widely used in Brazilian and international geotechnical practice, but associated with high construction complexity, strong dependence on rigorous operational procedures and limitations on frequent and automated data acquisition. This paper presents and discusses the application of the Automatic Settlement Profiler (ASP), a technological solution based on the hydrostatic principle, designed for automatic acquisition, distributed profiling and integration with digital monitoring systems. Design, installation, metrological performance, operational reliability and data analysis implications are

analysed, with emphasis on gains in resolution, reading frequency and traceability of time series. The paper reinforces the potential of the ASP as a robust and reliable technical alternative to traditional settlement monitoring systems, with particular emphasis on the spatial resolution gain provided by distributed instrumentation — which transforms point measurement into a continuous profile along the instrumented cross-section.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento sistemático de deslocamentos verticais internos em barragens de terra e enrocamento é componente essencial da auscultação geotécnica. Os Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás [1] estabelecem que o controle de recalques é requisito fundamental para verificar o comportamento do maciço nas fases críticas de construção e primeiro enchimento, subsidiando a análise de segurança e a validação dos modelos de projeto. A Política Nacional de Segurança de Barragens — PNSB, instituída pela Lei n.º 12.334/2010 [10] —, reforçou essa importância ao estabelecer obrigações formais de auscultação e relatórios periódicos para barragens de maior risco e dano potencial associado.

Na engenharia geotécnica brasileira e internacional, o medidor hidrostático de recalque por transbordamento — caixa sueca, no Brasil, e overflow gage, hydraulic leveling device ou water overflow pot na literatura estrangeira — consolidou-se como instrumento de referência. Dunnicliff [2], em obra clássica sobre instrumentação geotécnica, dedica a seção 12.10 aos liquid level gages, categoria que inclui os overflow gages, discutindo funcionamento, vantagens, limitações e fontes de erro. Oliveira [3] documenta a instalação e operação de caixas suecas em barragens brasileiras de enrocamento com face de concreto, incluindo a Barragem de Foz do Areia (PR). Cruz [4] e Silveira [13] apresentam a evolução e o estado da arte desses instrumentos no Brasil, enquanto USACE [8] e USBR [9] consolidam boas práticas internacionais.

A crescente demanda por monitoramento contínuo, automatizado e rastreável — intensificada pelos eventos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019) e pelas revisões regulatórias subsequentes — evidencia limitações estruturais da caixa sueca em barragens de alto risco. A necessidade de campanhas periódicas em campo, procedimentos de deaeração e flushing, ausência de automação nativa e caráter pontual da medição tornam o sistema convencional menos adequado às exigências atuais.

Este artigo apresenta e discute o Automatic Settlement Profiler (ASP), sistema automático e distribuído de monitoramento de recalques desenvolvido pela Osprey Measurement Systems [5][6], como alternativa tecnicamente fundamentada ao método convencional. A análise compara aspectos metrológicos, construtivos, operacionais e interpretativos dos dois sistemas, visando subsidiar decisões de projeto quanto à escolha da solução de monitoramento. O trabalho baseia-se na documentação técnica do fabricante, em Dunnicliff [2] como referência metrológica

primária, na literatura geotécnica especializada, em normas e manuais técnicos nacionais e internacionais, e em projetos de instrumentação desenvolvidos no Brasil.

2. O MEDIDOR HIDROSTÁTICO POR TRANSBORDAMENTO — A CAIXA SUECA

2.1 Princípio de Funcionamento e Constituição

O medidor hidrostático de recalque por transbordamento — caixa sueca — baseia-se no princípio dos vasos comunicantes. Dunnicliff [2, p. 275] define os liquid level gages como instrumentos com tubo ou duto preenchido por líquido para determinar deformações verticais relativas, a partir da equivalência de nível em manômetro ou da pressão transmitida pelo fluido. Segundo o autor, sua principal aplicação é o monitoramento de recalques em aterros e fundações de barragens, como alternativa a extensômetros de sonda vertical, plataformas de recalque e pontos de recalque em subsuperfície.

O instrumento consiste em uma célula metálica cilíndrica, vedada nas extremidades e instalada no interior do maciço no ponto de interesse. A célula é conectada, por tubulação de polietileno de pequeno diâmetro interno — tipicamente 4 mm, conforme Dunnicliff [2, p. 84] —, a um painel de leitura na face de jusante. Possui tubo de aeração, que mantém a pressão atmosférica interna, tubo de drenagem e, em versões de quatro tubos, tubo adicional de circulação para verificação e manutenção da continuidade do fluido. O recalque é obtido pela variação de nível no painel ao longo do tempo, corrigida pelo nivelamento topográfico periódico das extremidades externas dos tubos [3][7].

A Figura 1 apresenta o funcionamento da caixa sueca, adaptado da Figura 12.91 de Dunnicliff [2], destacando a célula com ponto de transbordamento, o tubo com líquido desareado, a escala de leitura, o tubo de ventilação e o tubo de drenagem, todos compartilhando o mesmo nível de líquido pelo princípio dos vasos comunicantes.

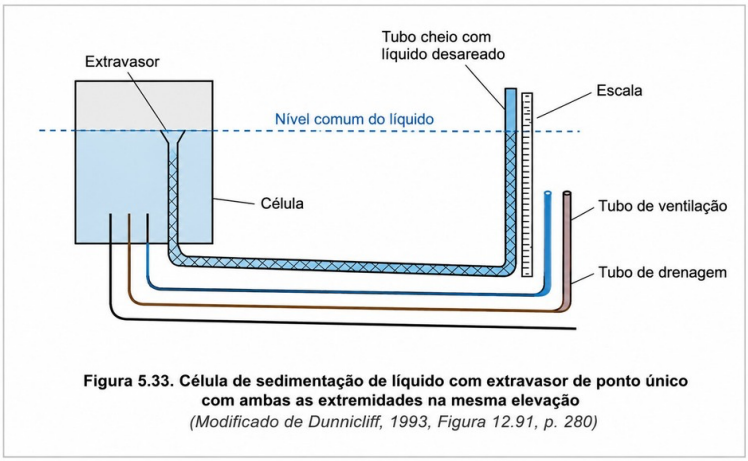


Figura 5.33. Célula de sedimentação de líquido com extravasor de ponto único com ambas as extremidades na mesma elevação
(Modificado de Dunnicliff, 1993, Figura 12.91, p. 280)

Figura 1 — Célula de sedimentação de líquido com extravasor de ponto único, com ambas as extremidades na mesma elevação: extravasor, célula, tubo preenchido com líquido

desareado, escala, tubo de ventilação e tubo de drenagem. (Modificado de Dunnicliff [2], 1988, Figura 12.91, p. 280.)

A construção é executada em campo com tubo de aço de 110 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, vedado por chapas de aço de 6 mm e envolvido em caixa de concreto pré-moldado para proteção. O conjunto é instalado em vala aberta no maciço, com berço de areia e brita, com declividade mínima de 3% a partir da célula em direção ao painel de leitura, sem sifões ou pontos baixos ao longo do percurso. As tubulações são protegidas por conduíte metálico galvanizado ao longo do percurso até o painel de leitura, que requer abrigo de proteção contra intempéries na face externa da barragem [3][7].

A Figura 2 ilustra as seções instrumentadas típicas de uma Barragem de Enrocamento com Face de Concreto (BEFC) e de uma Barragem de Enrocamento com Núcleo de Argila (BENA), evidenciando o posicionamento das caixas suecas (Caixa Seca) ao longo das camadas horizontais do maciço e os painéis de leitura instalados na face de jusante. Na BEFC, as células são distribuídas em três a quatro camadas horizontais, percorrendo a seção transversal desde a face de concreto até o paramento de jusante. Na BENA, as células instrumentam o núcleo de argila e as abas de enrocamento separadamente, refletindo as diferentes características de compressibilidade dos materiais. Em ambos os casos, cada célula fornece um único ponto de leitura por campanha — limitação central abordada pelo ASP com a instrumentação distribuída ao longo do perfil.

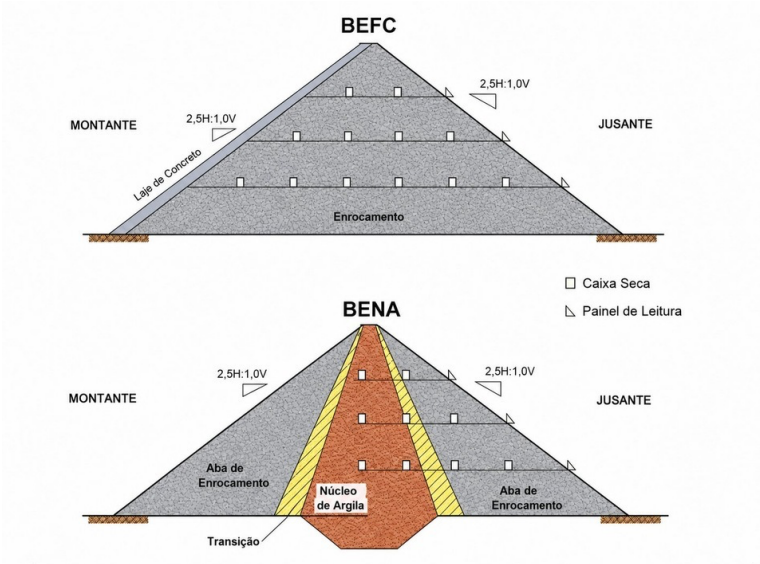


Figura 2 — Seções instrumentadas típicas de BEFC (Barragem de Enrocamento com Face de Concreto) e BENA (Barragem de Enrocamento com Núcleo de Argila), com posicionamento das caixas suecas (Caixa Seca) e dos painéis de leitura. Adaptado de Oliveira [3].

A Figura 3 apresenta um painel de leitura de caixas suecas em operação real, instalado em abrigo de alvenaria na face de jusante de uma barragem brasileira. São visíveis os quatro pares de tubos metálicos perfurados com escala graduada — um par por célula instalada no maciço —, as mangueiras de polietileno que conduzem o fluido desde as células enterradas até o painel, e as tubulações de entrada e

drenagem na parte inferior. O conjunto evidencia a infraestrutura física significativa associada ao sistema: o abrigo de proteção, o painel metálico fixado à parede, a multiplicidade de conexões hidráulicas e o espaço dedicado necessário para acomodar o equipamento de leitura de apenas quatro células. Fonte: acervo G5 Engenharia.



Figura 3 — Painel de leitura de caixas suecas em operação real, instalado em abrigo de alvenaria na face de jusante. Visíveis: quatro pares de tubos graduados em metal perfurado, mangueiras de PE conectando as células enterradas no maciço e tubulações de drenagem. Fonte: acervo G5 Engenharia.

2.2 Fontes de Erro e Limitações Operacionais

Dunnicliff [2, p. 275] aponta três principais fontes de erro nos *liquid level gages*: variações de densidade do líquido por temperatura, efeitos de tensão superficial em tubulações de pequeno diâmetro e descontinuidade do líquido por presença de gás, considerada a maior fonte potencial de erro nos *overflow gages*. Por isso, o autor ressalta a necessidade de cuidados rigorosos para garantir a ausência de ar na tubulação.

Para os *overflow gages*, Dunnicliff [2, Tabela 12.9, pp. 276–279] registra precisão aproximada de ±10 a 20 mm no tipo *single-point* com leitura acima da célula. Entre suas limitações estão a exigência de mesma elevação barométrica nas extremidades, a necessidade de desaeração regular e o monitoramento de apenas um ponto por instrumento. Penman et al. (1975), citados por Dunnicliff [2, p. 280], recomendam o *flushing* da tubulação com líquido desaerado antes de cada leitura para obter resultados reprodutíveis.

Oliveira [3] mostra, com base em barragens brasileiras de enrocamento, que o desempenho do instrumento depende fortemente da disciplina operacional e da manutenção. Nivelamento topográfico periódico, declividade constante sem sifões e

substituição do fluido desaerado a cada 6 a 12 meses exigem atenção contínua das equipes de campo e geram custos recorrentes ao longo da vida útil da estrutura.

Além dessas limitações metrológicas, a caixa sueca também apresenta restrições práticas relevantes no monitoramento moderno de barragens.

- **Baixa frequência de aquisição:** a ausência de automação exige campanhas periódicas em campo. Nas fases de alteamento acelerado ou primeiro enchimento, quando o maciço apresenta comportamento mais dinâmico, manter alta frequência de leituras torna-se especialmente difícil.
- **Infraestrutura significativa:** abrigo para painel de leitura, nivelamento topográfico periódico, gestão do fluido e manutenção das tubulações geram custos operacionais recorrentes, muitas vezes subestimados no planejamento.
- **Medição pontual:** cada célula fornece apenas um valor de recalque por seção. A caracterização do perfil depende do número e posicionamento das células, sem medição direta das variações entre pontos instrumentados.
- **Vulnerabilidade construtiva:** tubulações de polietileno de pequeno diâmetro são suscetíveis a danos durante a compactação e o tráfego de máquinas. A perda do instrumento durante a obra impede sua substituição no ponto original.
- **Dependência de operador qualificado:** leitura, interpretação e manutenção exigem pessoal treinado. Dunnicliff [2] destaca que o instalador deve conhecer fundamentos de geotecnia e particularidades do instrumento, sendo o cuidado operacional decisivo para seu desempenho.

2.3 A Caixa Sueca no Contexto Normativo Brasileiro e Internacional

Os Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás [1] tratam o monitoramento de recalques internos como requisito de projeto para barragens de aterro, consolidando sua aplicação em empreendimentos hidrelétricos no Brasil. O Manual do Empreendedor da ANA [11], Volume VII, define requisitos mínimos de instrumentação, operação, manutenção, frequência de leitura e registro dos dados de auscultação para barragens sob regulação federal.

No plano internacional, o EM 1110-2-1908 do USACE [8], revisado em 2020, e o USBR DS-13(11) [9] listam os *overflow settlement gages* entre os instrumentos aplicáveis à detecção de recalques de fundação e de camadas internas de aterros. O USACE destaca ainda a importância da redundância instrumental e da integridade dos dados históricos, princípios que reforçam a adequação de sistemas automatizados como o ASP em programas modernos de auscultação. A ASCE, no Manual n.º 135 [12], também documenta sua aplicação e apresenta critérios de seleção e posicionamento dos instrumentos.

Oliveira [3] registra o uso extensivo de caixas suecas em barragens brasileiras de enrocamento com face de concreto, incluindo Foz do Areia (PR), Segredo (PR) e outras estruturas do sistema elétrico nacional. Sua ampla difusão no Brasil decorre de fatores históricos, da familiaridade das equipes técnicas e do baixo custo inicial, sendo

presença comum em projetos de instrumentação de barragens de terra, enrocamento e rejeitos.

3. O AUTOMATIC SETTLEMENT PROFILER (ASP)

3.1 Descrição Técnica do Sistema

O Automatic Settlement Profiler (ASP), desenvolvido e patenteado pela Osprey Measurement Systems, é um instrumento de monitoramento hidrostático distribuído, projetado especificamente para a medição automática de recalques e soerguimentos em estruturas geotécnicas — barragens de terra e enrocamento, aterros sobre solos moles, pilhas de rejeitos, fundações profundas e estruturas de contenção [5].

O sistema é constituído por uma linha hidráulica em polietileno de média densidade (PEAD) com 25 mm de diâmetro externo, preenchida com solução de glicerol aquoso ambientalmente inerte, ao longo da qual são distribuídos sensores de pressão digitais — denominados nós de medição — em espaçamentos configuráveis de 1 m, 2,5 m ou 5 m. Cada sensor mede independentemente a pressão hidrostática local em tempo real. A variação diferencial de pressão entre cada sensor e um ou mais sensores de referência — posicionados fora da zona de influência do recalque, em local estável — é convertida em deslocamento vertical com precisão submilimétrica [5][6].

A comunicação entre os sensores e o sistema de aquisição de dados é realizada por protocolo Modbus RTU, via barramento RS-485, por meio de um único cabo de sinal que percorre toda a extensão do instrumento. Essa arquitetura de comunicação é amplamente utilizada em sistemas de automação industrial e de monitoramento geotécnico, garantindo compatibilidade nativa com a grande maioria dos dataloggers disponíveis no mercado [5][6].

O instrumento pode ser instalado diretamente em vala escavada no maciço com reaterro de areia compactada, em conduíte existente, fixado a estruturas ou embutido em concreto. O arranjo é independente de orientação, não requerendo ferramentas especiais de alinhamento durante a instalação. As especificações técnicas publicadas pelo fabricante [5][6] são:

- Resolução: 0,01 mm
- Acurácia / Precisão: ±1 mm
- Range de diferença de elevação: 8 m
- Comprimentos padrão: 25 m, 50 m, 75 m, 100 m e 125 m (extensível com múltiplos sistemas em série)
- Espaçamento entre sensores: 1 m, 2,5 m ou 5 m (configurável em fábrica)
- Capacidade por datalogger: até 100 sensores
- Tensão de alimentação: 5 a 18 V — compatível com dataloggers a bateria e com alimentação solar

- Fluido: solução aquosa de glicerol — ambientalmente segura, não tóxica, não corrosiva
- Temperatura de operação: 0 a 40 °C
- Protocolo de comunicação: Modbus RTU via RS-485

A Figura 4 apresenta o detalhe dos nós sensores ao longo da mangueira PEAD, evidenciando a integração entre a linha hidráulica e os sensores digitais de pressão. A Figura 5 ilustra o esquema típico de instalação em aterro.

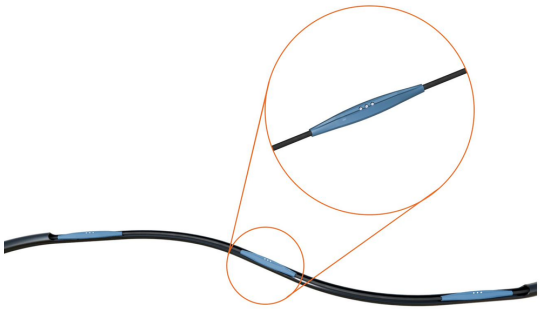


Figura 4 — Detalhe dos nós sensores do ASP ao longo da linha hidráulica PEAD. Cada nó realiza medição independente de pressão hidrostática local com resolução de 0,01 mm e saída digital via Modbus RTU. Fonte: Osprey Measurement Systems [5].

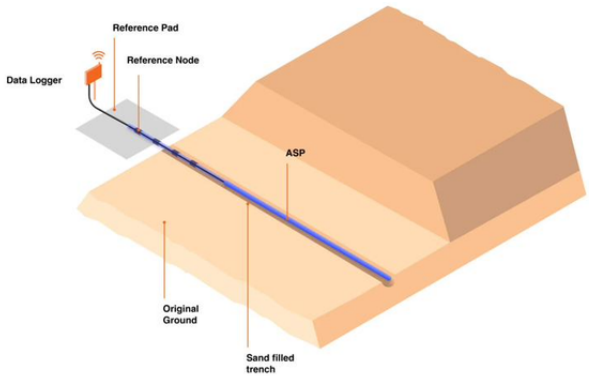


Figura 5 — Esquema de instalação típica do ASP em aterro: vala preenchida com areia, sensor de referência posicionado fora da zona de influência do recalque e datalogger externo. Fonte: Osprey Measurement Systems [5].

3.2 Vantagens Técnicas e Operacionais em Detalhe

As vantagens do ASP em relação à caixa sueca decorrem de uma diferença essencial de concepção: o ASP é um sistema fechado, digital e projetado para permanecer soterrado em condições estáveis, enquanto a caixa sueca é um sistema aberto, de leitura manual e dependente de infraestrutura externa. Cada vantagem discutida a seguir responde diretamente a limitações técnicas ou operacionais dos *liquid level gages* documentadas por Dunnicliff [2].

3.2.1 Enterramento completo e estabilidade térmica

Dunnicliff [2, p. 275] aponta que os *liquid level gages* são sensíveis a variações de densidade do líquido causadas pela temperatura, uma das fontes fundamentais de erro do método. No caso da caixa sueca, esse efeito é ampliado porque as tubulações frequentemente atravessam trechos expostos a variações térmicas externas, desde o interior do maciço até o painel de leitura na face de jusante.

O ASP, instalado em vala e coberto por material granular no interior do maciço, permanece isolado das variações térmicas externas após a execução do aterro. Como a temperatura do solo em profundidades típicas é relativamente estável ao longo do ano, elimina-se o efeito de gradiente térmico na linha. Assim, a estabilidade térmica do fluido é garantida pela própria condição construtiva, sem necessidade de correções ou procedimentos operacionais específicos.

3.2.2 Sistema selado — eliminação da descontinuidade de fluido

Dunnicliff [2, p. 275] identifica a descontinuidade do líquido por presença de gás como a maior fonte potencial de erro nos *overflow gages*, exigindo cuidados rigorosos para evitar ar na tubulação. O autor recomenda *flushing* periódico com líquido desaerado (p. 280), procedimento indicado por Penman et al. (1975) antes de cada leitura para obter resultados reprodutíveis.

O ASP é entregue com o sistema hidráulico preenchido com solução de glicerol aquoso e hermeticamente selado com terminações metálicas em aço inoxidável, sem reservatório externo ou interface com a atmosfera. Essa configuração elimina estruturalmente a entrada e o acúmulo de bolhas de ar — principal causa de leituras duvidosas na caixa sueca —, dispensando desaeração, *flushing* ou substituição de fluido ao longo da vida útil do instrumento.

3.2.3 Sistema montado — instalação simples e menor risco

O ASP é fornecido montado, testado e calibrado de fábrica. A instalação em campo limita-se à abertura da vala, posicionamento sobre leito de areia, passagem do cabo de sinal e reaterro com material adequado e compactação controlada. Não há montagem de painel, abrigo de proteção, preparo de fluido nem circulação do sistema em campo.

Dunnicliff [2, Foreword] ressalta que mesmo os melhores manuais não cobrem todas as condições de campo, sendo necessária experiência geotécnica e conhecimento do instrumento. Ao reduzir etapas construtivas, o ASP diminui diretamente o risco de erros de instalação, fator decisivo para o desempenho de longo prazo da instrumentação geotécnica.

A Figura 6 mostra o ASP chegando ao canteiro acondicionado em bobina, pronto para instalação, enquanto as Figuras 6 e 7 registram sua implantação em aterro, evidenciando a agilidade e simplicidade operacional do processo.



Figura 6 — ASP chegando ao canteiro de obras completamente montado, testado e calibrado de fábrica, acondicionado em bobina pronta para instalação direta em vala. Fonte: Osprey Measurement Systems.



Figura 7 — Equipe de instalação posicionando o ASP sobre a superfície do aterro compactado antes do lançamento na vala. Observa-se a mangueira PEAD de 25 mm e o cabo de sinal RS-485. Fonte: Osprey Measurement Systems.



Figura 8 — Vista geral da frente de instalação do ASP em aterro, com a mangueira estendida sobre a superfície compactada. A simplicidade logística da operação contrasta com a complexidade de instalação das caixas suecas. Fonte: Osprey Measurement Systems.

3.2.4 Robustez mecânica — adequação ao ambiente de obras

A mangueira do ASP, fabricada em PEAD com 25 mm de diâmetro externo e terminações em aço inoxidável, apresenta resistência mecânica significativamente superior às tubulações de polietileno de 4 mm de diâmetro interno utilizadas na caixa sueca. Dunnicliff [2, p. 281] registra que precauções especiais devem ser tomadas para proteger as tubulações próximas à célula contra danos durante o processo de recalque, e recomenda proteção adicional com conduíte nas zonas de passagem de maquinaria. Em ambiente de obra, onde equipamentos pesados transitam sobre o aterro e o solo é compactado em camadas sobre as instalações, a resistência física do instrumento é um atributo crítico de confiabilidade. A baixa suscetibilidade a danos mecânicos do ASP reduz o risco de perda do instrumento durante a construção — evento documentado em obras brasileiras como uma das principais causas de falha prematura de caixas suecas.

3.2.5 Manutenção mínima ao longo da vida útil

Uma vez instalado e comissionado, o ASP não requer intervenções de manutenção no instrumento em si. O único procedimento periódico necessário é a troca das baterias do datalogger de aquisição — tarefa simples, de baixo custo e executável por equipe local sem treinamento especializado. Em contraste, a manutenção de um sistema de caixas suecas ao longo de uma operação de 10 a 30 anos envolve: verificações periódicas do fluido; procedimentos regulares de flushing com leituras antes e depois, conforme recomendado por Dunnicliff [2, p. 280]; substituição do fluido desaerado a intervalos de 6 a 12 meses; manutenção do painel de leitura e do abrigo de proteção; e eventuais reparos de tubulação. A análise de ciclo de vida dos dois sistemas revela que o custo operacional acumulado da caixa sueca ao longo de 20 anos pode superar significativamente o investimento inicial no ASP, especialmente em estruturas com múltiplas seções instrumentadas.

3.2.6 Desempenho metrológico superior

A comparação metrológica direta com os dados do próprio Dunnicliff [2, Tabela 12.9, pp. 276–279] é reveladora. O autor registra, para o single-point overflow gage com leitura acima da célula, precisão aproximada de ±0,4 a 0,8 polegadas (±10 a 20 mm). Para os full-profile overflow gages, a precisão é de ±0,1 a 0,8 polegadas (±3 a 20 mm). O ASP, com precisão especificada pelo fabricante em ±1 mm e resolução de 0,01 mm, representa uma melhoria de uma a duas ordens de grandeza em relação aos valores documentados por Dunnicliff para os sistemas convencionais de overflow.

Essa diferença tem implicações práticas diretas na capacidade de detectar tendências de recalque em seus estágios iniciais — precisamente quando a intervenção técnica é mais eficaz para a gestão de segurança da estrutura. A capacidade de identificar variações de recalque da ordem de milímetros ou frações de milímetros ao longo de uma campanha de alteamento permite correlações mais precisas com dados de piezometria e com os modelos de comportamento adotados no projeto.

3.3 Perfilamento Distribuído — A Mudança Conceitual

Para além das vantagens técnico-operacionais individuais discutidas nas seções anteriores, o ASP introduz uma mudança conceitual fundamental no monitoramento de recalques em barragens: a transição do dado pontual para o perfil de recalques distribuído ao longo da seção instrumentada.

A caixa sueca, por construção, fornece um único valor de recalque por instrumento instalado. Dunnicliff [2, Tabela 12.9] registra explicitamente como limitação dos overflow gages o fato de que "only single point is monitored". A caracterização do comportamento de uma seção transversal depende inteiramente do número e do posicionamento das células instaladas, com variações espaciais de deformação entre os pontos instrumentados completamente inacessíveis à medição direta. Essa limitação é particularmente crítica em maciços heterogêneos, em zonas de transição de material ou em seções onde se espera variação significativa de compressibilidade entre o núcleo e os espaldares.

O ASP, com sensores espaçados de 1 m a 5 m ao longo de perfis transversais ou longitudinais do maciço, entrega um perfil contínuo de recalques com densidade de informação sem precedente nos sistemas convencionais. Essa densidade espacial de informação habilita análises que simplesmente não são possíveis com dados pontuais:

- Identificação de zonas de maior compressibilidade ou heterogeneidade no interior do maciço, correlacionáveis com os resultados de sondagens e ensaios de laboratório realizados durante a investigação geotécnica do projeto;
- Detecção de gradientes de deformação que podem sinalizar comportamentos anômalos — frentes de adensamento não previstas, concentrações de tensão em zonas de transição, heterogeneidades de fundação;
- Correlação espacial entre o perfil de recalques e dados de piezometria, inclinometria e marcos de superfície, permitindo uma interpretação integrada e consistente do comportamento global da estrutura;
- Suporte a back-analyses e calibração de modelos numéricos de comportamento do maciço com maior fundamento experimental, reduzindo as incertezas associadas à extrapolação de dados pontuais;
- Detecção precoce de anomalias localizadas — como recalques diferenciais anômalos em uma zona específica da seção — que poderiam passar despercebidos em um sistema de monitoramento puramente pontual;
- Validação contínua dos modelos de recalque adotados no projeto, com possibilidade de atualização das previsões à medida que a construção avança.

4. ANÁLISE COMPARATIVA

A Tabela 1 sintetiza os principais critérios de comparação técnica e operacional entre os dois sistemas. Os dados relativos à caixa sueca são fundamentados na Tabela

12.9 de Dunnicliff [2, pp. 276–279] e nas referências complementares citadas ao longo do texto. Os dados do ASP são provenientes da documentação técnica do fabricante [5][6]. A tabela foi construída de forma a cobrir não apenas os aspectos metrológicos, mas também os aspectos operacionais, de instalação, de manutenção e de integração com os sistemas digitais de monitoramento — dimensões igualmente relevantes para a tomada de decisão em projetos de instrumentação.

Tabela 1 — Comparativo técnico entre caixa sueca e ASP

CRITÉRIO	CAIXA SUECA	ASP
Princípio físico	Hidrostático por transbordamento — sistema aberto	Hidrostático selado — sistema fechado, saída digital
Tipo de medição	Pontual — uma célula por seção instrumentada	Distribuída — múltiplos sensores ao longo do perfil
Aquisição de dados	Manual — campanhas periódicas de campo	Automática e contínua (configurável)
Resolução	~1 mm (leitura visual em escala graduada)	0,01 mm (saída digital)
Acurácia / precisão típica	±10–20 mm — Dunnicliff [2], Tabela 12.9	±1 mm (especificação do fabricante)
Efeito de temperatura	Significativo — linhas sujeitas a gradientes externos	Eliminado — instrumento totalmente enterrado
Fluido hidráulico	Sistema aberto: desaeração e flushing periódico necessários	Sistema selado de fábrica: sem intervenção no fluido
Continuidade do fluido	Principal fonte de erro — Dunnicliff [2], p. 275	Garantida pelo sistema selado
Instalação em campo	Complexa: berço, tubulação, painel de leitura, abrigo	Simplificada: chega montado, instalação em vala
Manutenção recorrente	Fluido, desaeração, flushing, painel, abrigo	Apenas troca de bateria do datalogger
Automação / telemetria	Limitada ou inexistente nativamente	Nativa — Modbus RTU / RS-485
Densidade espacial	Pontual por seção — Dunnicliff [2], p. 277	Configurável: sensores a cada 1, 2,5 ou 5 m
Resistência mecânica	Tubulação PE ø 4 mm — suscetível a danos mecânicos	Mangueira PEAD ø 25 mm — robusta
Integração com SCADA	Requer conversores e adaptações específicas	Protocolo Modbus RTU nativo, plug-and-play
Custo de instalação	Médio-alto (painel, abrigo, tubulações, berço)	Baixo-médio (vala, areia, cabo de sinal)
Custo operacional (10 anos)	Alto (manutenção, campanhas, fluido)	Baixo (apenas baterias e transmissão de dados)

Fonte: Dunnicliff [2, pp. 275–285]; Oliveira [3]; Osprey Measurement Systems [5][6]; elaborado pelos autores.

A análise da tabela mostra que o ASP supera a caixa sueca nos principais critérios metrológicos e operacionais. Em aspectos como resolução, automação, estabilidade térmica, manutenção e densidade espacial da informação, a diferença é qualitativa. Do ponto de vista metrológico, enquanto Dunnicliff [2] documenta precisões de ±10 a 20 mm para overflow gages em campo, o ASP especifica ±1 mm, com resolução de 0,01 mm, representando melhoria de uma a duas ordens de grandeza.

Dois pontos merecem destaque. O primeiro é o custo operacional de longo prazo: embora a caixa sueca possa apresentar menor custo inicial, os gastos com manutenção, campanhas de campo, substituição de fluido e eventual reposição de instrumentos danificados, ao longo de 20 a 30 anos, podem superar o custo do ASP, sobretudo quando considerado o maior valor da informação gerada — mais frequente, densa e confiável.

O segundo é o valor da informação produzida. Um perfil distribuído de recalques, com 10 a 25 pontos ao longo de uma seção transversal, não representa apenas maior volume de dados, mas uma informação qualitativamente distinta. Ele permite identificar padrões espaciais de deformação, correlacionar recalques com piezometria e validar modelos de comportamento em tempo quase real, ampliando a capacidade de gestão da segurança da estrutura.

Ainda assim, a caixa sueca pode ser adequada em contextos específicos, como projetos com orçamento inicial restrito, obras menores com baixa exigência de frequência e continuidade de dados, ou situações em que a familiaridade operacional local seja determinante. A escolha entre os sistemas deve considerar os objetivos de monitoramento, o perfil de risco, as exigências regulatórias e o horizonte de operação da barragem.

5. ASPECTOS DE PROJETO E INSTALAÇÃO DO ASP EM BARRAGENS

5.1 Critérios de Definição do Sistema

A definição da configuração do ASP em um projeto de instrumentação de barragem deve considerar os objetivos de monitoramento, a geometria da estrutura, o comportamento esperado do maciço e os requisitos de integração com o sistema geral de auscultação. Os parâmetros de projeto primários são o comprimento das seções instrumentadas, o espaçamento entre sensores e o posicionamento das seções em relação às demais instrumentações — piezômetros, inclinômetros, extensômetros e marcos de superfície.

O espaçamento entre sensores é definido em função da heterogeneidade esperada do maciço e da resolução espacial desejada para o perfil de recalques. Como orientação geral:

- Espaçamento de 5 m: adequado para perfis em seções transversais de barragens de médio e grande porte, onde se deseja caracterizar a variação de recalques entre o núcleo, as zonas de transição e os espaldares. Um sistema de 50 m com sensores a cada 5 m resulta em 10 pontos de medição ao longo da seção, o que já representa um ganho substancial em relação a uma ou duas células pontuais.
- Espaçamento de 2,5 m: indicado em zonas de maior variabilidade esperada, como transições de material ou regiões próximas à fundação, onde se deseja maior resolução espacial para identificação de anomalias localizadas.

- Espaçamento de 1 m: recomendado em situações de grande variação espacial esperada, em estruturas de menor porte ou em zonas específicas onde a precisão espacial é crítica para a tomada de decisão — como a região do núcleo impermeável em barragens de enrocamento com face de concreto.

5.2 Configurações de Instalação

A instalação do ASP em seções transversais — percorrendo o maciço no sentido montante-jusante, na cota de interesse — permite obter o perfil de recalques ao longo da seção típica da barragem, correlacionável com os resultados de sondagens, ensaios de laboratório e modelos de comportamento. Essa configuração é a mais comum em barragens novas, sendo planejada e executada durante a construção do aterro.

A instalação em seções longitudinais — paralelas ao eixo da crista, ao longo da extensão da estrutura — permite monitorar a uniformidade dos recalques ao longo da extensão da barragem, detectando eventuais concentrações ou descontinuidades associadas a variações de fundação, de material de aterro ou de geometria da seção. Essa configuração é particularmente útil em barragens de grande extensão ou em estruturas com histórico de comportamento não uniforme ao longo do eixo.

Em barragens existentes onde se deseja retrofitar o monitoramento de recalques — substituindo caixas suecas danificadas ou obsoletas —, o ASP pode ser instalado em conduítes existentes ou em valas abertas em cortes executados no aterro durante campanhas de alteamento ou de manutenção. Essa flexibilidade de instalação amplia significativamente o universo de aplicações do instrumento.

5.3 Integração com Sistemas Digitais de Monitoramento

A compatibilidade nativa do ASP com protocolo Modbus RTU e sua baixa demanda de energia — compatível com dataloggers a bateria e com sistemas de alimentação solar —, permitem integração direta com a infraestrutura de automação e telemetria já em operação na maioria dos projetos de instrumentação geotécnica modernos. O Capítulo 6 do EM 1110-2-1908 [8] apresenta recomendações específicas para o projeto de sistemas automatizados de aquisição de dados, incluindo critérios de seleção de protocolos de comunicação, requisitos de redundância de armazenamento e orientações sobre a importância de manter a capacidade de leitura manual como backup — o que o ASP atende nativamente por meio de sua saída Modbus RTU. O sistema pode ser configurado para leituras em intervalos que variam de minutos a horas, dependendo dos requisitos de monitoramento e da capacidade de transmissão de dados disponível.

A integração com plataformas de monitoramento remoto — sistemas SCADA, dashboards web ou plataformas especializadas em geotecnia — permite a visualização em tempo quase real dos perfis de recalque, a configuração de alarmes baseados em gatilhos de deslocamento e a exportação automática de relatórios periódicos. Essa capacidade atende diretamente às crescentes exigências de

monitoramento contínuo e de documentação automática das séries temporais estabelecidas pela PNSB [10] e pelo Manual da ANA [11].

6. SEGURANÇA DE BARRAGENS E CONTEXTO REGULATÓRIO BRASILEIRO

6.1 O Marco Regulatório e as Exigências de Monitoramento

A Política Nacional de Segurança de Barragens — PNSB —, instituída pela Lei n.º 12.334/2010 [10] e regulamentada pela Resolução ANA n.º 144/2012, estabelece um sistema de gestão de segurança para barragens com maior risco ou dano potencial associado. Entre seus instrumentos centrais estão o Plano de Segurança da Barragem (PSB), o Plano de Ação de Emergência (PAE), as inspeções regulares e o monitoramento sistemático com registro e transmissão periódica dos dados de auscultação.

O Manual do Empreendedor da ANA [11], Volume VII, define requisitos mínimos de instrumentação, frequências de leitura e parâmetros de controle por categoria de barragem. Para estruturas de categoria de risco A ou dano potencial associado alto, podem ser exigidas leituras diárias em fases críticas, requisito que, na prática, favorece sistemas automatizados. No contexto internacional, o EM 1110-2-1908 do USACE [8], revisado em novembro de 2020, aborda a automação da instrumentação no Capítulo 6 e as frequências de coleta no Capítulo 8, seção 8.4, vinculando-as aos modos potenciais de falha da estrutura.

Nesse cenário, frequência de aquisição, rastreabilidade das séries temporais e integração com sistemas de alerta tornam-se atributos de segurança operacional. O ASP atende diretamente a esses requisitos por meio de leituras automáticas, registro sistemático com data e hora, exportação em formatos padronizados, como CSV e Modbus, e integração a plataformas de monitoramento, facilitando relatórios periódicos e a manutenção do histórico exigido pelos órgãos reguladores.

6.2 O Contexto das Barragens de Rejeitos

As barragens de rejeitos representam um contexto técnico particularmente exigente para a instrumentação geotécnica. A combinação de materiais de baixa resistência e alta compressibilidade, alteamentos frequentes com ritmo controlado pelo processo produtivo, histórico de falhas catastróficas no Brasil e no mundo, e a crescente pressão regulatória por monitoramento contínuo em tempo real, torna o monitoramento de recalques um elemento de segurança operacional crítico nessas estruturas.

Os eventos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019) resultaram em revisões substanciais do marco regulatório setorial, com destaque para a Lei n.º 14.066/2020 [14], que alterou a PNSB e estabeleceu exigências mais rigorosas para barragens de mineração, incluindo a obrigatoriedade de instrumentação e de sistemas de

monitoramento automatizados. A Resolução ANM n.º 95/2022 estabelece, especificamente, os requisitos de monitoramento geotécnico para barragens de mineração, com exigências de monitoramento contínuo para estruturas das categorias de maior risco.

Nesse contexto, as limitações da caixa sueca tornam-se ainda mais evidentes: a baixa frequência de leitura, a dependência de equipes em campo — muitas vezes em áreas de risco —, e a ausência de rastreabilidade automática das séries temporais são deficiências que comprometem diretamente a capacidade de detecção precoce de comportamentos anômalos. O ASP, com sua capacidade de leitura contínua integrada a sistemas de telemetria e alarme, é tecnicamente compatível com as exigências de monitoramento estabelecidas para barragens de rejeitos das classes de maior risco no Brasil.

6.3 Contribuição para a Gestão de Risco

A adoção de sistemas de monitoramento automatizados e distribuídos como o ASP contribui diretamente para a qualidade da gestão de risco em barragens em múltiplas dimensões. Em primeiro lugar, a maior frequência e a maior densidade espacial dos dados de recalque permitem a identificação precoce de tendências anômalas — recalques diferenciais localizados, aceleração de taxas de recalque, desvios em relação aos modelos de comportamento — que poderiam indicar o desenvolvimento de mecanismos de instabilidade em seus estágios iniciais.

Em segundo lugar, a rastreabilidade automática das séries temporais — com registro da data e hora de cada leitura, valores individuais de cada sensor e histórico completo de dados armazenado em nuvem ou em servidor local — fornece uma base documental robusta para as análises de segurança periódicas, para as revisões de segurança e para eventuais investigações em caso de comportamento anômalo. Essa documentação automática atende diretamente às exigências de registro e de relatório estabelecidas pela PNSB [10] e pelo Manual da ANA [11].

Em terceiro lugar, a integração nativa com sistemas de alarme — configuráveis para disparar alertas quando os recalques em qualquer sensor ultrapassam limiares de atenção ou emergência definidos no PAE da barragem — permite uma resposta operacional mais ágil e fundamentada em dados em tempo quase real. Essa capacidade é particularmente relevante em situações de alteamento acelerado ou de eventos climáticos extremos, quando o risco de comportamento anômalo é mais elevado.

7. CONCLUSÕES

O medidor hidrostático por transbordamento — caixa sueca — é instrumento consagrado na instrumentação de barragens no Brasil e no exterior, com ampla aplicação em usinas hidrelétricas e barragens de rejeitos. Dunnicliff [2] documenta

suas capacidades e limitações, destacando a descontinuidade do fluido como principal fonte de erro e os efeitos da temperatura sobre as leituras. Tais limitações são inerentes ao método, e não apenas decorrentes de falhas de execução.

O Automatic Settlement Profiler (ASP) representa uma evolução tecnológica relevante do método convencional. Ao preservar o princípio hidrostático em um sistema fechado, digital, automatizado e distribuído, o ASP mitiga limitações dos overflow gages e acrescenta recursos indisponíveis nas caixas suecas. As principais conclusões técnicas são:

- O sistema hidráulico selado elimina a principal fonte de erro dos overflow gages — a presença de ar e a descontinuidade do fluido — dispensando desaeração, flushing e substituição periódica do fluido, procedimentos apontados por Dunnicliff [2, p. 275–280] como críticos para a confiabilidade do método convencional.
- O enterramento integral no maciço isola o sistema das variações térmicas externas, eliminando outra fonte relevante de erro dos liquid level gages [2, p. 275].
- A entrega montada e calibrada de fábrica simplifica a instalação e reduz riscos de execução, fator essencial para o desempenho de longo prazo da instrumentação geotécnica.
- O invólucro em PEAD de 25 mm oferece maior robustez mecânica que as tubulações de pequeno diâmetro da caixa sueca, reduzindo o risco de danos durante a construção.
- A manutenção limita-se à troca periódica das baterias do datalogger, em contraste com as rotinas de flushing e desaeração recomendadas para overflow gages [2, p. 280].
- A precisão de ±1 mm e a resolução de 0,01 mm posicionam o ASP em nível metrológico superior aos overflow gages, cujas leituras usuais em campo apresentam precisão da ordem de ±10–20 mm [2, Tabela 12.9].
- O perfilamento distribuído supera a limitação pontual dos overflow gages — “only single point is monitored” [2, p. 277] — permitindo obter um perfil contínuo de recalques e análises mais robustas de comportamento e risco.
- A integração nativa com protocolos digitais, como Modbus RTU/RS-485, e sistemas de alarme atende às exigências crescentes de monitoramento contínuo e automatizado previstas pela PNSB [10] e normas brasileiras.

A substituição das caixas suecas pelo ASP é tecnicamente justificável em novos projetos e recomendável, mediante avaliação criteriosa, em estruturas existentes nas quais as limitações operacionais do sistema convencional comprometam a confiabilidade, frequência ou continuidade do monitoramento. A decisão deve considerar os objetivos de auscultação, o perfil de risco da barragem, as exigências regulatórias e o horizonte de operação.

A instrumentação geotécnica de barragens não é apenas obrigação regulatória, mas um ativo de segurança. Tecnologias que ampliam a confiabilidade, frequência, densidade espacial e rastreabilidade dos dados fortalecem a detecção precoce de anomalias e a capacidade de resposta operacional, contribuindo diretamente para a segurança das estruturas e das comunidades a jusante.

PALAVRAS-CHAVE

Recalques; barragens; instrumentação geotécnica; medidor hidrostático; caixa sueca; perfilador automático de recalques; ASP; monitoramento automatizado; segurança de barragens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(Seguindo padrão ICOLD, as citações se dão com numeração sequencial, na mesma ordem em que aparecem ao longo do texto.)

[1] ELETROBRÁS — Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (2003) — "Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas". Rio de Janeiro: Eletrobrás.

[2] DUNNICLIFF, J. (1988) — "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance". New York: John Wiley & Sons. (Seção 12.10: Liquid Level Gages, pp. 275–291; Seção 8.2: Hydraulic Instruments, pp. 80–96.)

[3] OLIVEIRA, R. R. V. (2004) — "Instrumentação e Análise de Deslocamentos em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto". Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/6368/. (Capítulo 4: Instrumentação para Medida de Deslocamentos, Figuras 27 e 28.)

[4] CRUZ, P. T. (coord.) (2009) — "Barragens de Enrocamento com Face de Concreto". São Paulo: Oficina de Textos. (Capítulo 15: Instrumentação e Auscultação.)

[5] OSPREY MEASUREMENT SYSTEMS (2025) — "Automatic Settlement Profiler (ASP) — Product Datasheet v1.4". Disponível em: https://ospreymeasurement.systems/products/asp/. Acesso: maio 2025.

[6] OSPREY MEASUREMENT SYSTEMS (2025) — "Automatic Settlement Profiler — User Manual, Rev. 1.1". Documento MA-M10.

[7] FONSECA, A. P. (2003) — "Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento". Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

[8] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS — USACE (2020) — "Engineering and Design: Instrumentation of Embankment Dams and Levees". Engineer Manual EM 1110-2-1908, 30 November 2020. Washington, DC: USACE, CECW-EG. (Capítulo 5, Seção 5.4: Measurement of Deformation; Capítulo 6: Automation; Capítulo 8, Seção

8.4: Data Collection Frequency.) Disponível em: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Users/182/86/2486/EM%201110-2-1908.pdf. Acesso: maio 2025.

[9] U.S. BUREAU OF RECLAMATION — USBR (2014) — "Design Standards No. 13: Embankment Dams — Chapter 11: Instrumentation and Monitoring (DS-13(11)-9)". Denver, CO: USBR.

[10] BRASIL (2010) — Lei n.º 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Diário Oficial da União, Brasília, DF.

[11] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS — ANA (2015) — "Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, Volume VII: Guia para Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens". Brasília: ANA.

[12] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS — ASCE (2018) — "Monitoring Dam Performance: Instrumentation and Measurements". ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 135. Reston, VA: ASCE.

[13] SILVEIRA, J. F. A. (2006) — "Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento". São Paulo: Editora Oficina de Textos.

[14] BRASIL (2020) — Lei n.º 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei n.º 12.334/2010 (PNSB) e dispõe sobre medidas de segurança para barragens de mineração. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

CURRÍCULOS DOS AUTORES

	**Wilson Soares Jr** *Diretor de Instrumentação e Tecnologia – G5 Engenharia e Gerenciamento Ltda.* Engenheiro Civil pela UFPR, especialista em instrumentação e monitoramento e automação de estruturas geotécnicas com 25 anos de experiência, em projetos de infraestrutura, hidro geração e mineração.
	**Douglas José Penteado Auer** *Engenheiro Civil – G5 Engenharia e Gerenciamento Ltda.* Engenheiro Civil com atuação em instrumentação geotécnica e instalação de sistemas de monitoramento. Responsável pela execução dos serviços de campo descritos neste artigo, incluindo instalação, comissionamento e elaboração do relatório técnico.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.4
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

MONITORAMENTO EFICIENTE DE CORTINAS ANCORADAS USANDO RADAR DE SOLO E ESTAÇÃO TOTAL ROBÓTICA

Pamela LISBOA
Engenheira - Vale S.A.

Mateus DO LIBANO
Engenheiro - Vale S.A

Otoniel GONÇALVES
Analista - Vale S.A

Beatriz MAPA
Coordenadora - Vale S.A

Diego LAGE

Engenheiro - Vale S.A

RESUMO

O monitoramento de estruturas de contenção, como cortinas atirantadas, é fundamental para garantir a estabilidade de taludes e a segurança em obras de mineração. Este trabalho apresenta uma abordagem integrada de monitoramento, combinando o Radar Interferométrico de Solo (SAR) e a Estação Total Robótica (ETR), com o objetivo de avaliar a eficiência dessa aplicação conjunta na detecção de deslocamentos e instabilidades.

A metodologia baseou-se na instalação simultânea dos dois sistemas em uma obra real, possibilitando a coleta contínua de dados ao longo do tempo. O Radar Terrestre forneceu informações com alta frequência temporal e ampla cobertura espacial, enquanto a ETR permitiu o acompanhamento preciso de alvos prismáticos em pontos estratégicos da cortina. Os dados foram integrados em um sistema de gerenciamento geotécnico, viabilizando análises correlativas e validação cruzada.

Os resultados indicaram aumento significativo da confiabilidade do monitoramento, com detecção precoce de movimentações milimétricas e redução de incertezas na interpretação. Conclui-se que a integração entre Radar Terrestre e Estação Total Robótica constitui uma solução eficiente e robusta para o monitoramento de cortinas atirantadas, contribuindo para a segurança e a gestão preventiva de riscos geotécnicos.

ABSTRACT

Monitoring retaining structures, such as anchored retaining walls, is fundamental to ensuring slope stability and safety in mining operations. This work presents an integrated monitoring approach, combining Ground Interferometric Radar (SAR) and Robotic Total Station (RTS), with the objective of evaluating the efficiency of this joint application in detecting displacements and instabilities.

The methodology was based on the simultaneous installation of the two systems in a real construction site, enabling continuous data collection over time. Ground-based radar provided information with high temporal frequency and wide spatial coverage, while the RTS allowed for precise tracking of prismatic targets at strategic points on the retaining wall. The data were integrated into a geotechnical management system, enabling correlative analyses and cross-validation.

The results indicated a significant increase in monitoring reliability, with early detection of millimeter movements and a reduction in interpretation uncertainties. It is concluded that the integration between Ground-Based Radar and Robotic Total Station constitutes an efficient and robust solution for monitoring anchored retaining walls, contributing to safety and preventive management of geotechnical risks.

1. INTRODUÇÃO

As cortinas atirantadas são estruturas amplamente utilizadas em obras de contenção para estabilização de taludes e escavações profundas, especialmente em ambientes de mineração e infraestrutura urbana. Devido à sua função crítica na segurança das operações, o monitoramento eficiente dessas estruturas é fundamental para a detecção precoce de deslocamentos e possíveis falhas. Nas últimas décadas, o avanço tecnológico permitiu o desenvolvimento de sistemas automatizados de instrumentação geotécnica, oferecendo maior precisão, frequência de leitura e capacidade de resposta em tempo real.

Dentre as tecnologias disponíveis, destacam-se o Radar Interferométrico de Solo (Ground-Based SAR) e a Estação Total Robótica, que fornecem dados complementares e de alta resolução sobre o comportamento estrutural das cortinas. A combinação dessas ferramentas permite uma abordagem mais robusta e confiável de monitoramento, especialmente em cenários que exigem alta sensibilidade e automação.

Este artigo apresenta os resultados de um estudo de caso que mostra a eficiência da aplicação integrada dessas tecnologias no monitoramento de uma cortina atirantada em operação real, com foco na acurácia dos dados obtidos, na confiabilidade do sistema e na aplicabilidade prática em projetos de engenharia geotécnica.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo consistiu na implementação simultânea de dois sistemas de monitoramento em uma cortina atirantada localizada em um ambiente de mineração. Os instrumentos utilizados foram um Radar Interferométrico de Solo (SAR) e uma Estação Total Robótica (ETR), ambos configurados para coleta contínua e automatizada de dados.

O monitoramento foi realizado por meio do radar interferométrico terrestre HYDRA-X (IDS GeoRadar), equipamento baseado na tecnologia ArcSAR (Arc Synthetic Aperture Radar), destinado ao monitoramento remoto de estabilidade de taludes, barragens de rejeitos e escavações. O sistema possui alcance máximo de até 800 m, campo de visão de até 120° na horizontal e 30° na vertical, frequência de aquisição de 30 segundos e precisão de medição de deslocamentos na linha de visada de até 0,1 mm. O equipamento dispõe de câmera óptica HD integrada, processamento local de dados, geração automática de alarmes geotécnicos e operação em condições climáticas adversas (IP65, temperatura de -20 °C a +50 °C). ([1] Hexagon, 2026)



Figura 1 – Radar Interferométrico Terrestre HYDRA-X (Hexagon, 2026).

O Radar SAR usa um sistema de antena que emite pulsos de ondas em direção ao solo e depois coleta o sinal refletido. O processamento do sinal é usado para criar uma imagem em alta resolução da superfície terrestre ([2] Ferreira, 2022). O sistema SAR é capaz de produzir imagens independentes da iluminação do sol, da cobertura de nuvens e de outros obstáculos que afetam a coleta de imagens por satélites ópticos ou de sensores remotos. ([3] Diniz, 2023).

O GB-SAR é uma tecnologia amplamente empregada para monitoramento de taludes devido à sua capacidade de fornecer medições remotas contínuas com resolução espacial elevada e precisão milimétrica. No entanto, a técnica interferométrica é sensível a efeitos atmosféricos, especialmente variações espaciais e temporais de temperatura, pressão e umidade do ar ao longo do percurso do sinal eletromagnético. Essas condições podem introduzir atrasos atmosféricos e aumento do ruído interferométrico, gerando deslocamentos aparentes que precisam ser corrigidos por meio de técnicas de processamento e compensação atmosférica. Em cenários de relevo complexo e condições meteorológicas variáveis, esses efeitos podem representar uma das principais fontes de incerteza das medições radar. ([4] Su Y, 2022).

O monitoramento foi realizado por meio de uma Estação Total Robótica (ETR) Leica TM50 (Hexagon), equipada com sistema de centragem forçada e precisão angular de 0,5” (meio segundo de arco). O equipamento realiza medições automáticas de coordenadas tridimensionais (X, Y e Z), ângulos e distâncias para prismas instalados na estrutura, possibilitando a determinação e o acompanhamento de deslocamentos superficiais com elevada precisão. Os dados adquiridos são processados em software específico para análise da movimentação da estrutura monitorada. ([5] Leica, 2026).



Figura 2 – Estação Total Robótica modelo TM50 (Leica Geosystem, 2026).

A Estação Total Robótica é um instrumento de monitoramento de deslocamento superficial, horizontais e verticais, com métodos bem estabelecidos, tendo como principal objetivo o monitoramento a médio e longo prazo. Com alta precisão, esse equipamento realiza as leituras das coordenadas reais X, Y e Z (leste, norte e elevação), ângulos e distâncias com intervalo entre cada aquisição da ordem de minutos, de acordo com a malha de prismas instalados. ([6] Clemente, 2022).

A ETR fornece medições tridimensionais precisas em prismas instalados em pontos específicos da estrutura monitorada. Entretanto, seu desempenho depende da manutenção da linha de visada entre o equipamento e os prismas. A perda de prismas pode ocorrer devido a deslocamentos excessivos do maciço, danos mecânicos, desprendimento dos suportes, acúmulo de poeira, vegetação, interferências visuais ou obstruções temporárias. Além disso, dificuldades de rastreamento e redução da qualidade do retorno óptico podem aumentar o tempo de observação ou ocasionar perda de dados em determinados períodos. ([7] Geo-instruments, 2026)

A cortina possui três linhas de tirantes, exceto em um ou dois painéis onde se observam quatro linhas. Com altura aproximada de 8 m, a estrutura encontra-se parcialmente aterrada. Os tirantes aparentam ser do tipo barra, com comprimento estimado em cerca de 12 m. Entretanto, devido à ausência da documentação de projeto, não foi possível confirmar suas características técnicas, incluindo sistema adotado, diâmetro das barras, capacidade resistente, carga de protensão e demais parâmetros de dimensionamento. A indisponibilidade dessas informações limita a realização de análises detalhadas e pode demandar investigações complementares para a adequada avaliação do desempenho e da segurança da estrutura.

Nesse contexto, a utilização integrada das duas tecnologias constitui uma estratégia complementar e robusta, permitindo a validação cruzada dos resultados e reduzindo a dependência de um único sistema de monitoramento. A combinação dos dados de radar e ETR amplia a confiabilidade da detecção de deformações, ao mesmo tempo em que possibilita a identificação de eventuais limitações ou inconsistências associadas a cada método individualmente.

O radar terrestre foi posicionado para cobrir toda a cortina, permitindo medições de deslocamento com alta resolução. A Estação Total Robótica monitorou prismas em pontos estratégicos, gerando dados tridimensionais precisos. As aquisições foram

realizadas em intervalos de 15 minutos, com coleta contínua 24 horas por dia, 7 dias por semana (24/7). A Figura 3 apresenta o mapa com a localização de instalação dos instrumentos e prismas de monitoramento.

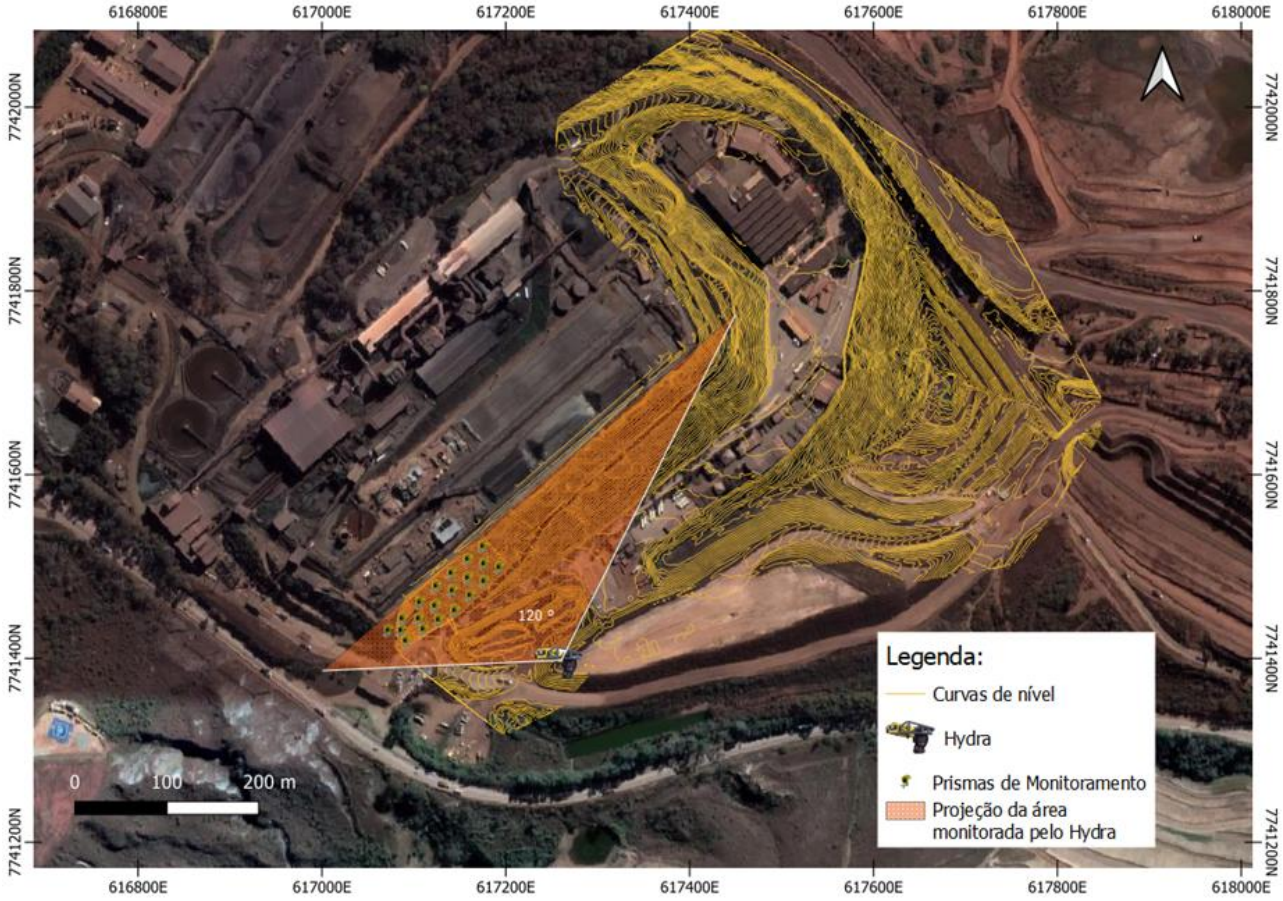


Figura 3 – Mapa de localização dos instrumentos e prismas de monitoramento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A cortina atirantada apresenta trinca na região superior, com agravamento em períodos de chuva. Foram instalados prismas monitorados por ETR, que indicaram deslocamentos na estrutura, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e análise detalhada de estabilidade. A Figura 4 apresenta o gráfico com os dados dos prismas que indicam indícios de deslocamento na região da cortina. A Figura 5 ilustra, em planta, a localização dos prismas que registraram variações nas medições e a trinca identificada durante a inspeção técnica de campo, situada na porção superior da cortina, nas proximidades dos prismas com movimentações detectadas. Foi possível identificar precocemente o início do deslocamento da cortina por meio das leituras milimétricas dos prismas, o que auxiliou na análise de estabilidade e na definição de medidas preventivas.

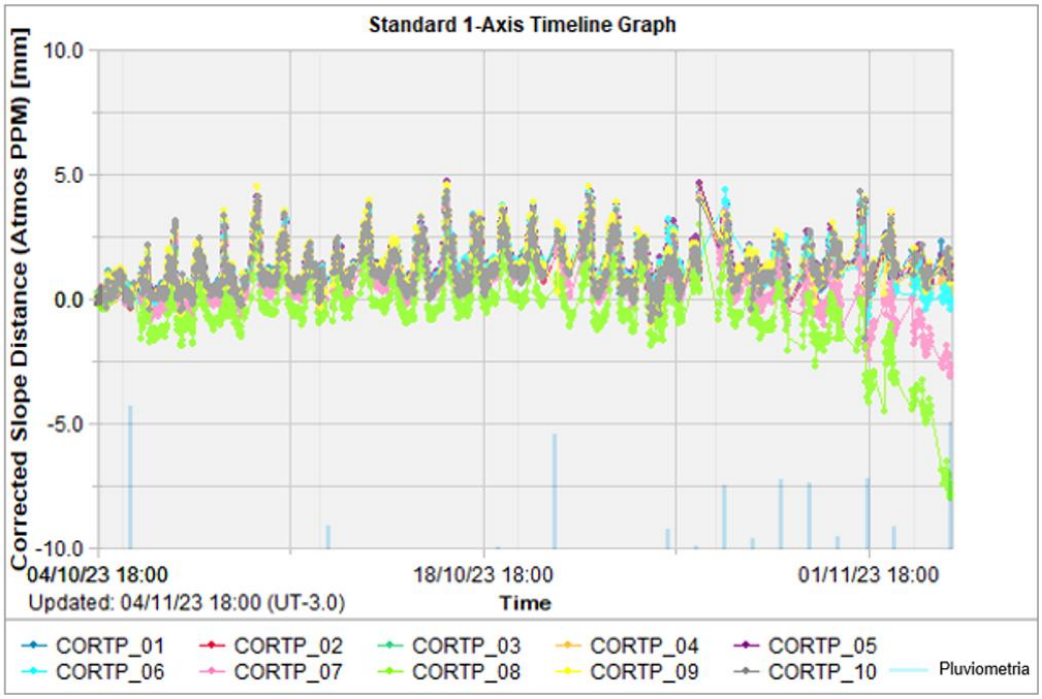


Figura 4 – Gráficos de deslocamento dos prismas de monitoramento.



Figura 5 – Localização em planta dos prismas de monitoramento e trinca observada em campo.

A análise do gráfico de Distância Inclinada, referente ao período de 04/10/2023 a 04/11/2023, indicou variações nos dados dos prismas CORTP_07 e CORTP_08. Foi observado deslocamento na distância inclinada de aproximadamente 2,5 mm e 7,5 mm, respectivamente, em relação à Estação Total Robótica (ETR), no dia 04/11/2023, sugerindo um movimento de aproximação dos pontos monitorados em direção ao equipamento.

Adicionalmente, foram observadas trincas na região superior da cortina, próximas aos prismas que apresentaram deslocamentos, o que poderia estar relacionado à

movimentação detectada. Esses indícios reforçam a importância do acompanhamento contínuo e de uma avaliação técnica mais aprofundada da estabilidade da estrutura.

Com o aumento do índice pluviométrico no período analisado, foi possível observar um avanço nos deslocamentos na região da cortina atirantada. As chuvas intensas possivelmente contribuíram para a elevação das pressões intersticiais no maciço e a redução da resistência dos materiais de suporte, favorecendo movimentações na estrutura. Esse comportamento foi corroborado pelos dados dos prismas instalados, que indicaram variações progressivas nas leituras de deslocamento, especialmente em pontos críticos previamente identificados. A associação entre o aumento da umidade e os deslocamentos reforça a necessidade de um monitoramento mais rigoroso em períodos chuvosos, além da avaliação de possíveis medidas de drenagem ou reforço estrutural para mitigar riscos associados à instabilidade.

A Figura 6 apresenta os gráficos com os dados dos prismas que indicaram aumento de deslocamento na região da cortina e a localização dos prismas que registraram variações significativas nas medições. A Figura 7 apresenta os gráficos com os dados do radar terrestre que indicam aumento de deslocamento e velocidade na região da cortina e o mapa de deslocamento. Já a Figura 8 exibe o aumento das trincas identificadas durante a inspeção técnica de campo, situada na porção superior da cortina, nas proximidades dos prismas com movimentações detectadas.

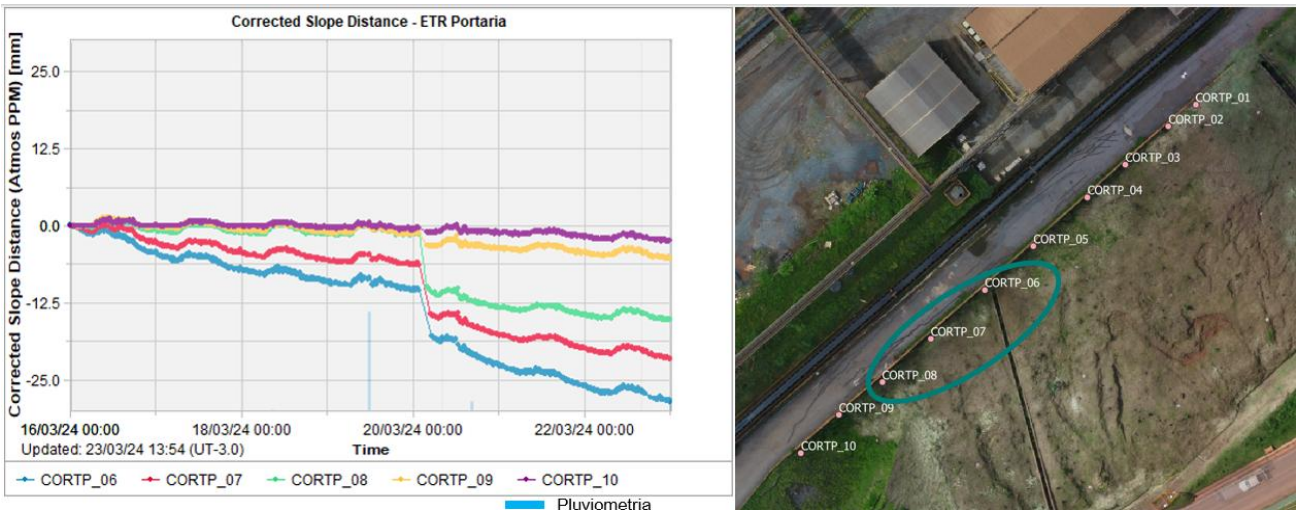


Figura 6 – Gráficos de deslocamento dos prismas de monitoramento e planta de localização.

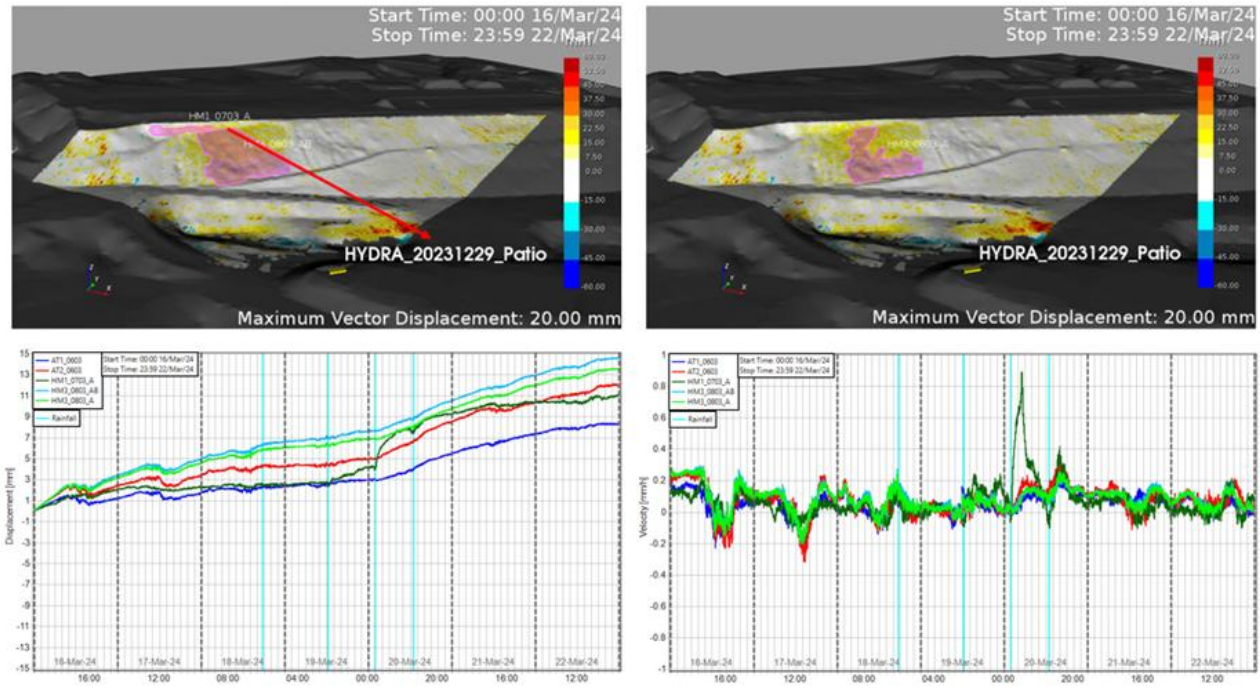


Figura 7 – Gráficos de deslocamento e velocidade do radar terrestre de monitoramento e mapa de deformação.



Figura 8 – Aumento das trincas observadas em campo.

Durante o período de 16/03/2024 a 23/03/2024, os dados obtidos por meio da Estação Total Robótica (ETR) revelaram variações nos deslocamentos dos prismas CORTP_06, CORTP_07 e CORTP_08, com alterações perceptíveis em todas as direções monitoradas. Em particular, o prisma CORTP_06 apresentou um deslocamento acumulado de aproximadamente 27 mm em distância inclinada nos últimos sete dias, indicando um movimento de aproximação em relação à ETR.

Complementando esse monitoramento, o radar terrestre, operando no período de 16/03/2024 a 22/03/2024, apontou um acúmulo de deslocamento na ordem de 15 mm na região central do talude, evidenciando um comportamento consistente com os dados registrados pela ETR.

Adicionalmente, durante a inspeção de campo realizada no mesmo período, foi identificado o avanço das trincas previamente mapeadas na estrutura, principalmente nas áreas próximas aos prismas com deslocamentos detectados. Esses resultados reforçam a necessidade de acompanhamento contínuo e avaliação técnica detalhada,

considerando a possibilidade de evolução do processo de instabilidade na região da cortina.

Com base nos dados obtidos por meio do monitoramento integrado da Estação Total Robótica (ETR) e do radar terrestre, foram estabelecidos limites de controle e protocolos de alerta que permitiram a identificação antecipada de movimentos significativos na estrutura. A definição desses limiares foi fundamental para subsidiar a tomada de decisão técnica, possibilitando a rápida mobilização de equipes e a adoção de medidas corretivas.

A Figura 9 apresenta uma matriz de níveis de alerta (TARP) para monitoramento de deformações de taludes, associada a critérios de precipitação, prismas topográficos, deslocamento e velocidade do radar terrestre, além das ações a serem tomadas em cada nível.

TARP #	Descrição do gatilho	Precipitação (WS Radar)	Prismas (LOS)	Deslocamento Radar (LOS)	Velocidade Radar	Ações
1	Condição normal, deformação dentro do nível de ruído	<0 mm/dia	Talude < 7 mm Cortina < 5 mm short-24h	<10 mm/dia	N2 < 2,00 mm/h	Operação normal
2	Deformação acima do nível de ruído, que sinalize mudança de comportamento do talude	>0 mm/dia	Talude > 10 mm Cortina > 7 mm short-24h	>10 mm/dia	N2 > 2,00 mm/h	Avaliar dados e alarmes diariamente antes do início das obras. Inspeção visual diária na região da Cortina e Talude.
3	Deformação com taxa linear	>0 mm/dia	Talude > 14 mm Cortina > 10 mm short-24h	>15 mm/dia	N3 > 3,00 mm/h	Avaliar dados e alarmes diariamente antes do início das obras. Inspeção visual diária na região da Cortina e Talude.
4	**Deformação progressiva ou perda**	**>0 mm/dia**	**Talude > 21 mm Cortina > 15 mm short-24h**	**>20 mm/dia**	**N4 > 4,00 mm/h**	**Avaliar dados e alarmes diariamente antes do início das obras. Inspeção visual diária na região da Cortina e Talude. Evacuação preventiva e inspeção de campo. Avaliação da condição para bloqueio das áreas de influência. Avaliação diária dos dados de monitoramento disponíveis.**

NÍVEL	ID	QUEM	-	PARA	AÇÃO
PERDA DE CONEXÃO	1	CMG	→	GO	**Caso perda parcial de conexão - radar ou ETR (tolerância de 30 minutos)** >> Informar a perda de conexão/aquisição de dados para lista de e-mails e grupo de whatsapp
	2	CMG	→	FAIXA 4	**Caso perda total de conexão - radar e ETR (tolerância de 30 minutos)** >> Realizar a comunicação via rádio com hierarquia de escalonamento e reportar para a lista de e-mails e grupo de whatsapp. **Faixa 4 (Detonação Fábrica)**
	3	FAIXA 4 - Supervisor			Garantir a evacuação completa da área e bloqueio da região.
	4	GO			Avaliar condições de campo e elaborar plano de atuação - evacuação/bloqueio/liberação **Geotecnia Operacional poderá decidir ou não pelo retorno das atividades paralisadas**

Figura 9 – Fluxo de Comunicação.

O monitoramento geotécnico é realizado por meio de quatro níveis de alerta (TARP), definidos com base em dados de precipitação, deslocamentos medidos por prismas, deslocamentos e velocidades monitorados por radar. Cada nível possui critérios específicos e ações correspondentes.

TARP 1 (Verde): condição normal, com deformações dentro do nível de ruído dos instrumentos. Ação: operação normal.

TARP 2 (Amarelo): deformação acima do nível de ruído, indicando possível mudança de comportamento do talude. Ações: avaliação diária dos dados e alarmes e inspeção visual diária da cortina e do talude.

TARP 3 (Laranja): deformação com taxa linear. Ações: avaliação diária dos dados e alarmes e inspeção visual diária da área monitorada.

TARP 4 (Vermelho): deformação progressiva ou condição crítica. Ações: paralisar as obras, inspeções de campo, avaliação preventiva, análise da necessidade de bloqueio das áreas de influência e acompanhamento diário dos dados de monitoramento.

Procedimento para Perda de Conexão

Em caso de perda parcial ou total de conexão do radar e/ou ETR por mais de 30 minutos, o CMG deve comunicar a ocorrência aos responsáveis. O Supervisor da deve garantir a evacuação e o bloqueio da área. A Geotecnia Operacional (GO) avalia as condições de campo e define as ações necessárias, incluindo possível retorno das atividades.

Procedimento para Chuva

Quando houver registro de chuva pela estação meteorológica, o CMG deve comunicar via rádio, e-mail e WhatsApp. O GO e o Supervisor devem garantir a evacuação e o bloqueio da área, quando necessário. O acompanhamento da chuva é informativo e as avaliações de risco são conduzidas pela GO e supervisão de turno.

Os limites de controle foram estabelecidos com base no histórico de comportamento da estrutura e nos níveis de ruído dos dados de monitoramento obtidos por radar terrestre e ETR.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a integração entre o Radar Interferométrico de Solo e a Estação Total Robótica representam uma solução eficiente e tecnicamente robusta para o monitoramento de cortinas atirantadas em ambientes de mineração. A combinação das duas tecnologias proporcionou uma visão mais abrangente e precisa do comportamento estrutural, aliando a cobertura ampla e em tempo quase real do radar à alta precisão pontual da ETR.

A abordagem integrada permitiu a detecção de deslocamentos milimétricos com antecedência suficiente para ações preventivas, contribuindo significativamente para a segurança operacional da estrutura. A redundância dos sistemas também se mostrou vantajosa, reduzindo incertezas e aumentando a confiabilidade das interpretações.

Além disso, a aplicação da metodologia em um cenário real reforça sua viabilidade prática e aplicabilidade em projetos de engenharia geotécnica que exigem monitoramento contínuo, alta sensibilidade e resposta rápida. Conclui-se que o uso integrado de tecnologias avançadas de instrumentação é um caminho promissor para elevar os padrões de monitoramento e gestão de risco em obras de contenção.

5. PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento, Cortina Atirantada, Radar Terrestre SAR, Estação Total Robótica, Deslocamento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] HEXAGON. Especificações Técnicas do Radar Interferométrico Terrestre HYDRA-X. Disponível em: https://idsgeoradar.com/products/interferometric-radar/hydra-x.

Acesso: 03 de julho de 2026

[2] FERREIRA, P.L.; Clemente, B. M.; Miranda, T.M.; Lima, V. B. O.; Gonçalves, D.L. (2022) – “Monitoramento de Barragem de Rejeito a Montante em Obras de Descaracterização”. COBRAE, Porto de Galinhas, Recife, Brasil.

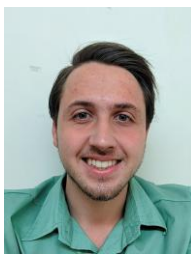
[3] DINIZ, E.; Lisboa, P; Miranda, O. (2023) – “Technologies for Monitoring Surface Displacements and their Applications in Dams of Mining”. Tailings 2023, Santiago, Chile.

[4] SU, Y.; Yang, H.; Peng, J. et al. A Novel Near-Real-Time GB-InSAR Slope Deformation Monitoring Method. Remote Sensing, 2022, 14(21), 5585.

[5] LEICA GEOSYSTEMS. Especificações Técnicas da Leica Nova TM50. Disponível em: https://leica-geosystems.com/pt-br/products/total-stations/robotic-total-stations/leica-nova-tm50, Acesso: 03 de julho de 2026.

[6] CLEMENTE, B.M.; Ferreira, P. L; Gonçalves, D.L. (2022) – “Detecção de Movimentação do Marco da Estação Total Robótica Influenciando Dados de Monitoramento”. COBRAE, Porto de Galinhas, Recife, Brasil.

[7] GEO-INSTRUMENTS. AMTS Monitoring Systems e Survey Prisms for AMTS. Documentação técnica sobre limitações operacionais, linha de visada e rastreamento de prismas. Disponível em: https://www.geo-instruments.com/technology/amts-systems/. Acesso: 06 de julho de 2026.

	**Pamela LISBOA** Graduada em Engenharia de Minas, pós-graduada em Geotecnia pela UniBF e pela Fundação Gorceix. Atua no monitoramento geotécnico e hidrogeológico na área de mineração desde 2011, atualmente é Engenheira Sênior na VALE S.A no Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG Sul), atuando em monitoramento remoto de cavas, pilhas e taludes industriais com análise de tecnologias convencionais e não convencionais.
	**Mateus DO LIBANO** Engenheiro Civil, Especialista em Geotecnia, com experiência na Vale desde 2020. Atua como Engenheiro Geotécnico Sênior na avaliação de inspeções e monitoramento de barragens de rejeitos, pilhas e taludes, elaboração de relatórios técnicos, análises em softwares de engenharia e acompanhamento de projetos de estabilização e descaracterização. Pós-graduação em Engenharia Geotécnica pela PUC Minas e graduação em Engenharia Civil pela UFLA.

	**Otoniel GONÇALVES** Graduado em Engenharia de Minas (2017), pós-graduado em Engenharia Geotécnica (2021) e Engenharia de Segurança do Trabalho (2021). Atua na área de mineração desde 2003, atualmente é Analista na Vale S.A no Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG Sul), atuando no monitoramento remoto de barragens, dique, pilhas, cavas e taludes com análise de tecnologias convencionais e não convencionais.
	**Beatriz MAPA** Engenheira Civil formada pela UFOP (2019), com mobilidade acadêmica na Universidade de Sevilla (2017). Mestre em Geotecnia pela UnB. Atualmente é Coordenadora no Centro de Monitoramento Geotécnico da Vale S.A., atuando na gestão da rotina operacional, pessoas e indicadores. Possui sólida experiência em monitoramento geotécnico remoto de barragens, pilhas e taludes, com análise integrada de tecnologias convencionais e avançadas.
	**Diego LAGE** Formado em engenharia de minas pela UFMG com pós-graduação em engenharia Geotécnica pela UFOP e cursando mestrado em Engenharia de Minas no Cefet-MG. Atua com monitoramento de estruturas Geotécnicas a 6 anos e atualmente é Engenheiro Sênior no Centro de Monitoramento Geotécnico na Vale.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.4
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

OTIMIZAÇÃO DA INSPEÇÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS POR MEIO DE APLICATIVO MOBILE

Brunna Cristina Almeida da SILVA
Analista em Gestão dos Recursos Hídricos - Cogerh

Mikaelle Duarte Mariano FEITOSA
Analista em Gestão dos Recursos Hídricos - Cogerh

Marcos Wesley Araujo LIMA
Analista de Sistema- Cogerh

Fernando Cordeiro de FREITAS
Analista de Sistema- Cogerh

Otacilio Correia Lima NETO
Analista em Gestão dos Recursos Hídricos - Cogerh

RESUMO

A Política Nacional de Segurança de Barragens estabelece como obrigação do empreendedor a realização das inspeções de segurança regulares. A Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (Cogerh) é responsável por 86 barragens estaduais e realiza essas inspeções em dois ciclos anuais, antes e após a quadra chuvosa. Nesse contexto, este trabalho apresenta o uso do aplicativo mobile, desenvolvido para dispositivos *Android*, com o objetivo de otimizar e automatizar as inspeções de segurança das barragens monitoradas pela Cogerh. A metodologia incluiu o desenvolvimento da ferramenta pela equipe de Tecnologia da Informação, testes internos, validação em campo, aplicação experimental pelas equipes responsáveis pelas inspeções e avaliação por questionário nas barragens em que o aplicativo foi utilizado. O aplicativo foi empregado em 39 das 86 barragens elegíveis, correspondendo a aproximadamente 45% do total previsto para o ciclo avaliado. Entre as avaliações registradas, predominaram notas entre 3 e 5, sem registros de notas 1 e 2. Os resultados indicam ganhos operacionais, especialmente na execução em campo com preenchimento *offline*, armazenamento das informações, registro fotográfico das anomalias, cálculo automático do produto Gravidade, Urgência e Tendência (GUT) e integração posterior dos dados ao Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos (Sigerh). Dessa forma, a ferramenta contribui para reduzir retrabalho, proteger os dados coletados e conferir maior agilidade e padronização ao processo de inspeção e tomada de decisão.

ABSTRACT

The Brazilian National Dam Safety Policy establishes that dam owners are responsible for carrying out regular safety inspections. The Ceará Water Resources Management Company (Cogerh) is responsible for 86 state dams and performs these inspections in two annual cycles, before and after the rainy season. In this context, this paper presents the use of a mobile application, developed for Android devices, to optimize and automate the safety inspections of the dams monitored by Cogerh. The methodology included the development of the tool by the Information Technology team, internal testing, field validation, experimental use by the inspection teams and assessment through questionnaires completed after use of the application at the tested dams. The application was used in 39 of the 86 eligible dams, corresponding to approximately 45% of the total planned for the evaluated cycle. Among the recorded evaluations, scores ranged from 3 to 5, with no scores of 1 or 2. The results indicate operational gains, especially in field execution, with offline completion, information storage, photographic recording of anomalies, automatic calculation of the Gravity, Urgency and Trend (GUT) score and subsequent integration of the data with the Integrated Water Resources Management System (Sigerh). Thus, the tool contributes to reducing rework, protecting collected data and providing greater agility and standardization to the inspection and decision-making process.

1. INTRODUÇÃO

A Lei n° 12.334/2010, alterada pela Lei n° 14.066/2020, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e, em seu art. 4°, determina como um de seus fundamentos a responsabilidade legal do empreendedor pela segurança da barragem [1,2].

No Ceará, a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (Cogerh) é a estatal empreendedora e responsável legal pelas barragens estaduais. Ao todo, 86 (oitenta e seis) barragens estão sob sua responsabilidade, sendo acompanhadas continuamente através do Programa de Gestão de Segurança de Barragens da Companhia, em seus três eixos de atuação: monitoramento, gestão de riscos e recuperação de barragens. O programa é aplicado pela Gerência de Segurança e Infraestrutura (Gesin), que monitora, analisa e orienta a gestão por meio das inspeções de segurança, instrumentação de barragens, metodologia de priorização para recuperação, buscando garantir a observância dos padrões de segurança dessas estruturas.

Considerando a distribuição espacial dos reservatórios em todo o Estado, a Cogerh adota um sistema descentralizado para melhor gestão dos recursos hídricos. Para as 12 (doze) bacias hidrográficas, existem 10 (dez) Gerências Regionais, as quais dão o suporte ao programa, através do Responsável Técnico pela Gestão de Segurança de Barragens, presente em cada gerência e dos Agentes de Guarda e Inspeção de Reservatório (Agir), lotados nos reservatórios.

A execução das Inspeções de Segurança Regular (ISRs) é fundamental para a implementação dos instrumentos previstos na PNSB e um dos mecanismos utilizados pela Gesin para alinhar a atuação da Cogerh à Política Nacional de Segurança de Barragens.

Os *checklists* são aplicados em dois ciclos, no primeiro e no segundo semestre. As inspeções avaliam as condições físicas das barragens e têm como finalidade identificar a anomalia, sua localização, sua evolução, a responsabilidade pela correção e sua gravidade para a segurança da estrutura. Essas informações fundamentam o planejamento e a execução de ações de manutenção e recuperação das barragens.

Os registros e o histórico desses ciclos são armazenados no Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos (Sigerh), sistema institucional acessado por plataforma *web.* Antes da implantação do aplicativo, os *checklists* eram preenchidos em campo de forma manual e posteriormente inseridos no Sigerh. Esse fluxo aumentava o tempo entre a inspeção e a disponibilização dos dados no sistema, além de ampliar o risco de perda de informações, retrabalho e inconsistências na transcrição.

A partir dessa demanda, foi desenvolvido o aplicativo mobile *Checklist* Barragens, com o intuito de otimizar o processo de inspeção, conferir maior fluidez aos trabalhos em campo e no escritório durante os ciclos de ISR e facilitar a integração das informações ao sistema institucional.

Este artigo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento, a implantação experimental e a avaliação inicial do aplicativo *Checklist* Barragens, utilizado para apoiar as Inspeções de Segurança Regular das barragens monitoradas pela Cogerh.

2. HISTÓRICO DAS ISRs DA COGERH

Os *checklists* são padronizados, e as ISRs têm periodicidade semestral. Acontecem em dois ciclos de inspeção visual das estruturas: o primeiro nos meses de dezembro e janeiro, antes da quadra chuvosa, e o segundo em junho e julho, após seu término.

A Companhia também possui um manual de preenchimento dos *checklists*, historicamente elaborado pela equipe da Gesin. A primeira publicação foi em 2008, com objetivo de auxiliar na classificação das anomalias e diminuir a subjetividade da avaliação. Após algumas revisões, a edição mais recente foi publicada em 2025 e elaborada através de um contrato com a empresa Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A. Essa atualização teve como principal objetivo aperfeiçoar a metodologia utilizada, além da elaboração do Manual para *Checklist* em Barragens de Concreto, buscando aumentar a segurança das estruturas [3,4].

Nesse contexto, a metodologia determina, com base em ponderação estatística, o Nível de Perigo (NP), por meio da aplicação de fichas de inspeção que classificam as anomalias quanto à situação, à gravidade, à urgência e à tendência de evolução.

A apresentação das classificações utilizadas no *checklist* é necessária porque o aplicativo foi desenvolvido para reproduzir digitalmente a lógica de avaliação já adotada pela Cogerh nas Inspeções de Segurança Regular.

As anomalias identificadas são classificadas quanto ao seu estado atual, podendo ser registradas como NA, NE, PV, DS, DI, AU, PC, NI, RM ou CR (Quadro 1). De acordo com as pontuações atribuídas de gravidade, urgência e tendência de evolução, é gerada uma matriz que determina o Nível de Perigo (Quadro 2), classificado em 0, 1, 2 ou 3 (Quadro 3), bem como a hierarquização resultante do produto GUT (Quadro 4).

Quadro 1 – Situação atual da barragem em relação ao item examinado [3,4].

SIGLA	SITUAÇÃO
NA	Não se Aplica à estrutura
NE	Não Existe
PV	Anomalia constatada pela Primeira
DS	Anomalia Desapareceu
DI	Anomalia Diminuiu
AU	Anomalia Aumentou
PC	Anomalia Permaneceu Constante
NI	Não foi Inspecionado
RM	Requer Monitoramento
CR	Anomalia Corrigida

Quadro 2 – Pontuação para a matriz GUT [3,4].

PONTUAÇÃO	GRAVIDADE (G)	URGÊNCIA (U)	TENDÊNCIA (T)
1	Sem Gravidade	Sem prioridade	Sem tendência de evolução
2	Pouco Grave	Programar correção	Evoluir em longo prazo
3	Grave	Correção dentro do próximo ano	Evoluir em médio prazo
4	Muito Grave	Correção dentro dos próximos meses	Evoluir em curto prazo
5	Extremamente Grave	Correção imediata	Agravar rapidamente

Quadro 3 – Nível de perigo das anomalias [3,4].

NP	CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO
0	Normal (verde)	Quando determinada anomalia não compromete a segurança da barragem.
1	Atenção (amarelo)	Quando determinada anomalia não compromete de imediato a segurança da barragem, mas, caso venha a progredir, pode comprometê-la, devendo ser monitorada, controlada ou reparada.
2	Alerta (laranja)	Quando determinada anomalia compromete a segurança da barragem, devendo ser tomadas providências imediatas para a sua eliminação.
3	Emergência (vermelho)	Quando determinada anomalia acarreta alta probabilidade de ocorrência de acidente ou desastre.

Quadro 4 – Grau de hierarquização da matriz GUT e nível de perigo [3,4].

PRODUTO GUT	HIERARQUIZAÇÃO	NÍVEL DE PERIGO	
GUT = 0*	Ação contínua/monitoramento	0	Normal
GUT ≤ 15	Longo prazo		
15 < GUT ≤ 45	Médio prazo	1	Atenção
45 < GUT ≤ 100	Curto prazo	2	Alerta
GUT > 100	Imediato	3	Emergência

Em 2022, foi colocado em produção o Sistema Integrado de Informações de Gestão de Recursos Hídricos (Sigerh), que integrou alguns sistemas utilizados pela Companhia e reuniu informações sobre as infraestruturas hídricas monitoradas. Trata-se de um sistema de uso interno, com algumas exceções de usuários externos, como no caso do monitoramento qualitativo. O acesso é feito pela *web* através do site http://sigerh.cogerh.com.br, o que permite acesso rápido, otimizando a busca e a interlocução de informações por parte dos usuários. O Sigerh é composto por quatro módulos: cadastro, monitoramento, fiscalização e medição. As informações sobre as barragens, seu monitoramento e sua gestão estão vinculados aos dois primeiros módulos.

Para a Gestão de Segurança de Barragens, o sistema contempla uma rede de monitoramento, que contém informações sobre características técnicas das barragens, cadastro de novos empreendimentos, acompanhamento da instrumentação, sistema de alerta dos instrumentos e geração automática dos relatórios de inspeção de segurança regular, os quais apresentam os resultados dos *checklists* preenchidos em campo.

3. APLICATIVO MOBILE *CHECKLIST* BARRAGENS

Como estratégia para modernizar esse processo e ampliar a capacidade de resposta, em 2024 iniciou-se o processo de desenvolvimento e a customização de um aplicativo móvel, por parte da Gerência de Tecnologia da Informação (Getin) da própria Companhia. O desenho do aplicativo foi espelhado no Sigerh, incorporando ao software a base de dados e padrões de design já empregados no sistema.

O aplicativo *Checklist* Barragens funciona como uma ferramenta móvel integrada ao Sigerh. Enquanto o Sigerh concentra os registros institucionais, o histórico das inspeções e a geração dos relatórios, o aplicativo permite a coleta das informações em campo, inclusive sem conexão com a *internet,* e o envio posterior dos dados ao sistema central.

A partir das informações inseridas pelo usuário durante o preenchimento do *checklist*, a ferramenta calcula automaticamente o produto GUT e o respectivo Nível de Perigo da anomalia, mantendo o procedimento de classificação já adotado pela Cogerh nas Inspeções de Segurança Regular.

A construção foi dividida em três etapas: desenvolvimento do protótipo do aplicativo por parte da Getin; teste e validação pela Gesin, e, por fim, uma etapa de transição, que consistiu na utilização do aplicativo pelas Gerências Regionais durante o período destinado às inspeções.

A ferramenta foi projetada especificamente para atender às necessidades das equipes de campo, focando na agilidade do preenchimento da ficha de inspeção e na confiabilidade do armazenamento dos dados coletados. Desenvolvida nas linguagens *Java e Dart (Flutter),* inicialmente funciona somente em dispositivos *Android*.

3.1 Funcionamento da ferramenta

O aplicativo foi estruturado para resolver o maior obstáculo das inspeções em locais remotos: a falta de conectividade. Para orientar o uso da ferramenta, a Gesin elaborou um Procedimento de Operação Padrão (POP) e o disponibilizou para as Gerências Regionais por meio de campo próprio inserido na Intranet da Companhia, por *e-mail* e por aplicativo de mensagens. Também foi disponibilizado o *link* para *download* em campo específico no Sigerh.

O fluxo de trabalho segue três etapas principais:

1. Sincronização de Dados: antes de ir a campo, o técnico responsável utiliza a *internet* para baixar os dados atualizados de todos os açudes e barragens que compõem sua rota;

2. Operação Totalmente *Offline*: no local da barragem, o técnico responsável realiza o *checklist* completo diretamente no celular. Todas as informações, observações e registros da vistoria ficam salvos localmente no dispositivo, garantindo que nenhum dado seja perdido por falta de sinal;

3. Integração com o Sistema Central: ao retornar para um local com *internet*, o usuário envia as vistorias concluídas. Esses dados são automaticamente integrados ao Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos.

a) Preparação e Sincronização

Cabe ao técnico acessar o menu lateral do aplicativo e selecionar a opção “Sincronização de Dados”. O procedimento exige o preenchimento dos campos Gerência, Município e Açude, seguido da confirmação da sincronização para que as informações da barragem sejam devidamente carregadas (etapa dependente de conexão com a *internet*).

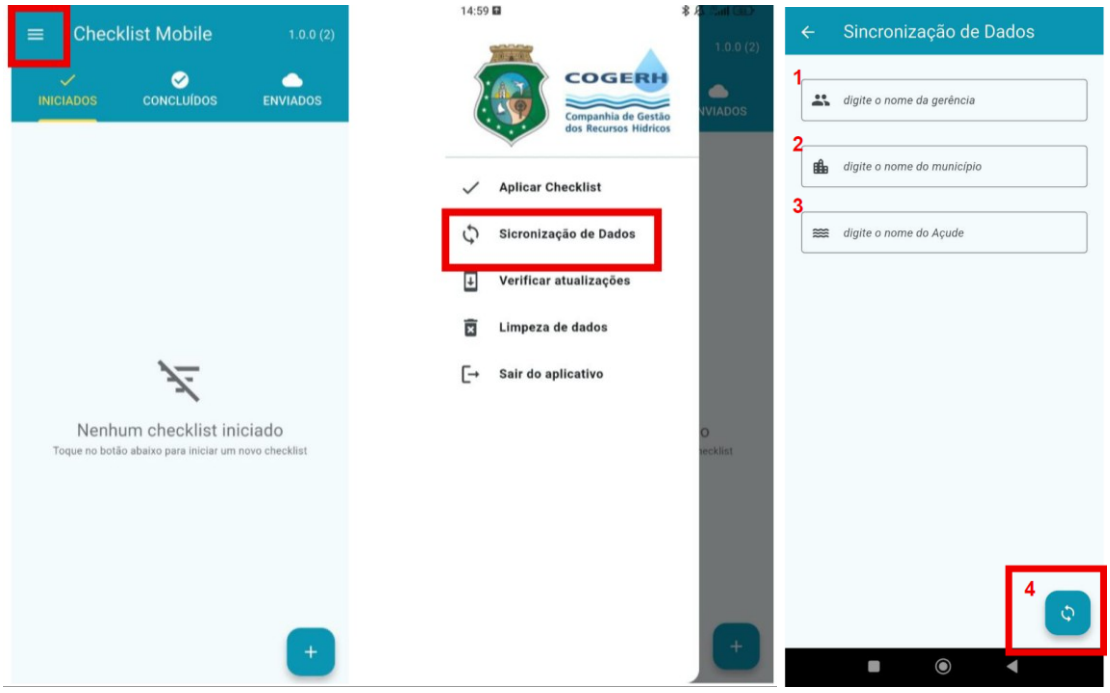


Figura 1 – Acesso ao menu e identificação de dados para sincronização [5].

b) Abertura do *Checklist*

O operador deve acionar o ícone “+” e selecionar a barragem desejada na lista de unidades sincronizadas. É importante destacar que essa etapa de adição do *checklist* pode ser executada sem acesso à rede.

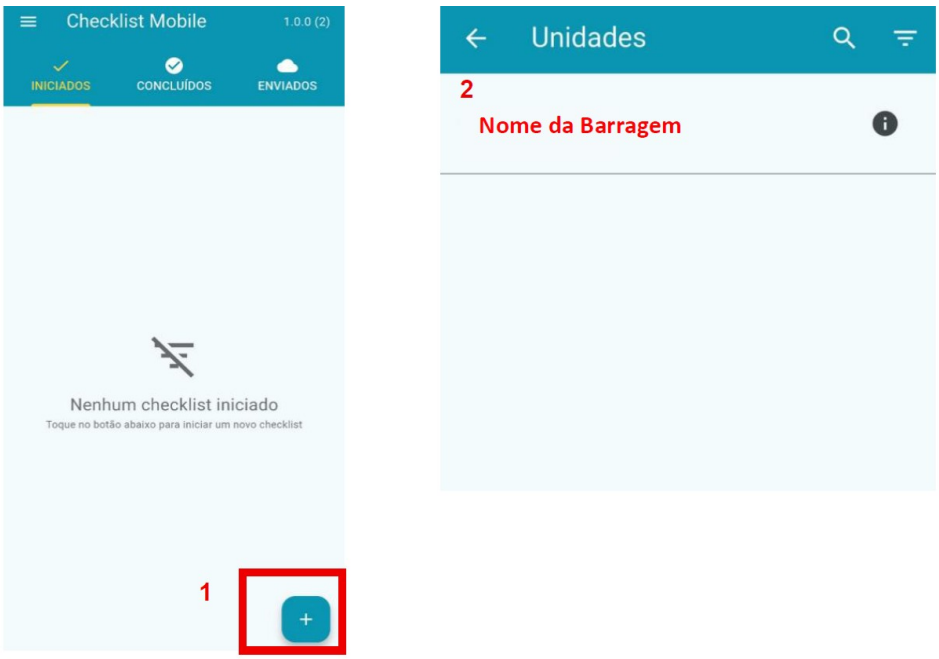


Figura 2 – Seleção da barragem sincronizada para início de uma nova inspeção [5].

c) Dados Básicos e Identificação

É necessário que o usuário valide as informações de unidade e bacia já preenchidas pelo sistema, inserindo as demais informações nos campos correspondentes.

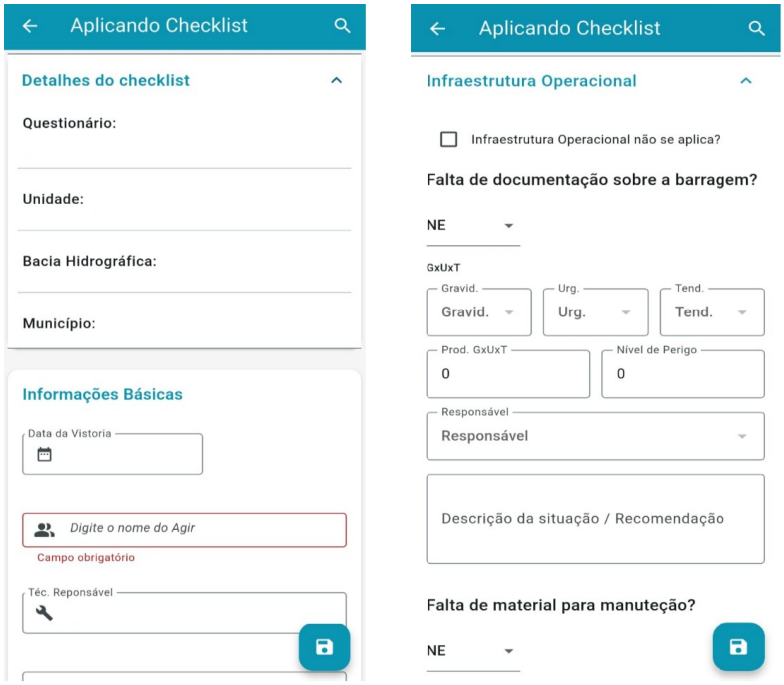


Figura 3 – Interface de coleta de dados [5].

d) Registro de Anomalias e Fotos

Compete ao técnico efetuar o registro fotográfico diretamente pelo aplicativo ou carregar uma imagem da galeria. Com a foto inserida, o usuário deve selecionar a localização e a anomalia correspondente, redigir a descrição da situação e salvar a imagem para integrá-la ao relatório.



Figura 4 – Registro fotográfico, classificação da anomalia e descrição da situação [5].

e) Salvamento Interno

Para arquivar a inspeção no dispositivo, o usuário utiliza o ícone de disquete. Após essa ação, o formulário é movido para a aba “CONCLUÍDOS”, onde permanece disponível para eventuais edições.

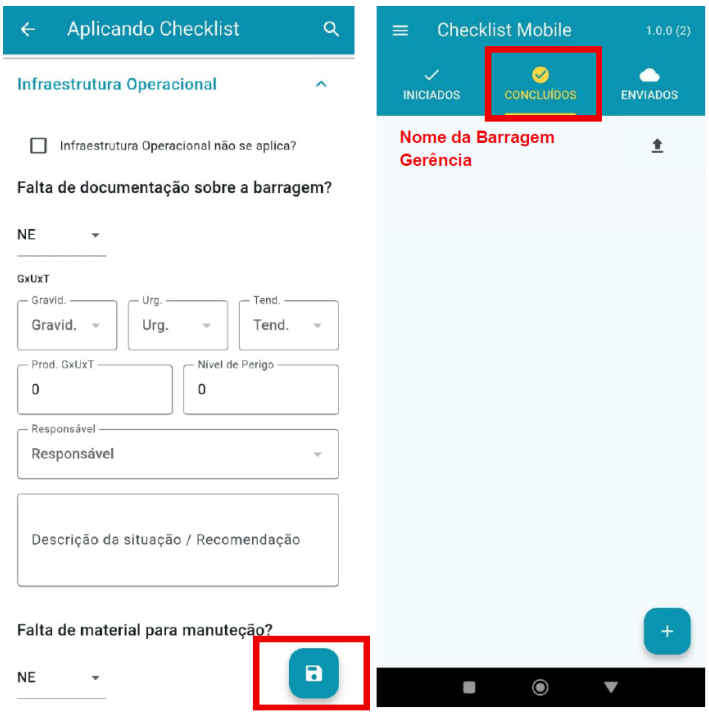


Figura 5 – Finalização do preenchimento e armazenamento do relatório na aba “Concluídos” [5].

f) Transmissão de Dados

O processo final envolve o acionamento do ícone de *upload* na aba "CONCLUÍDOS" para que o *checklist* seja enviado ao Sigerh. O envio bem-sucedido requer conexão com a *internet* e move automaticamente o arquivo para a aba "ENVIADOS".

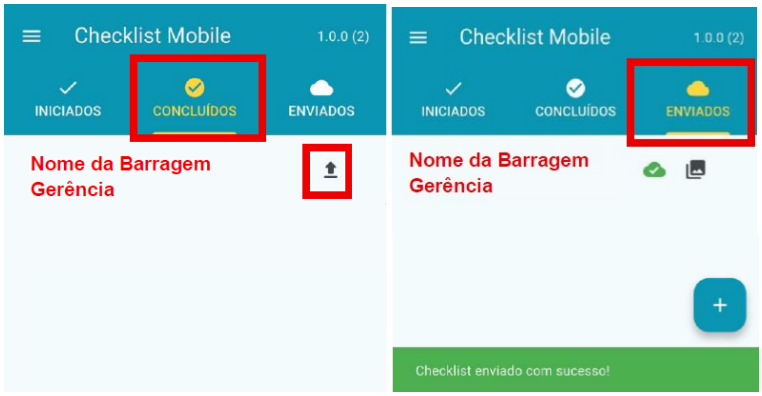


Figura 6 – Transmissão final do *checklist* para o Sigerh via ícone de upload [5].

3.2 Principais Benefícios Esperados para a Gestão de Segurança de Barragens

1. Integridade da Informação: a transição do papel para o digital traz ganhos diretos para a segurança operacional. O armazenamento local imediato elimina o risco de perda de anotações de campo, garantindo que o relatório final reflita exatamente o que foi observado;

2. Agilidade na Tomada de Decisão: com a integração direta ao Sigerh, os dados chegam mais rápido aos analistas, permitindo intervenções e manutenções preventivas em menor tempo;

3. Padronização: o uso de *checklists* digitais tem potencial para assegurar que todos os itens críticos de segurança sejam verificados de forma homogênea em todas as 86 barragens.

4. METODOLOGIA

A metodologia foi organizada em seis etapas principais: identificação das necessidades; desenvolvimento do protótipo pela equipe da Getin; testes internos pela equipe da Gesin; validação em campo em algumas barragens; correção das inconsistências identificadas e aplicação experimental pelas Gerências Regionais durante o ciclo de inspeções; e avaliação da ferramenta por meio de questionário aplicado para cada barragem em que o aplicativo foi utilizado. Essa organização permitiu acompanhar a evolução do aplicativo desde sua concepção até sua utilização inicial em condições reais de operação. Conforme fluxograma Figura 7.



Figura 7 – Fluxograma.

Ao longo de 2025, foram realizados testes do aplicativo pela equipe da Gesin. Em 19 de fevereiro, a equipe da Getin apresentou o aplicativo "*Checklist* Barragens" à equipe da Gesin. Em seguida, foram feitos testes em escritório, nos quais já foram identificadas correções básicas, como ajustes no nome da barragem e na identificação do responsável pela execução.

Em 8 de maio de 2025, técnicos da Gesin realizaram a primeira visita de campo à barragem Angicos para validar o aplicativo. Durante essa fase, foram identificadas inconsistências operacionais, como a duplicidade nas definições de anomalias e a restrição do registro fotográfico exclusivamente via captura direta pela câmera. Essa experiência foi fundamental para a evolução do sistema, motivando a implementação da funcionalidade que permite ao técnico integrar imagens diretamente da galeria do dispositivo.

Consolidadas as melhorias, a continuidade do desenvolvimento levou as equipes da Gesin e da Getin à barragem Amarelas, em 6 de junho de 2025, para a homologação das correções aplicadas e realização de testes de desempenho em ambiente real. O ciclo de aprimoramento foi formalmente concluído em 8 de janeiro de 2026, com a última validação em campo conduzida pela equipe da Gesin na barragem Catucinzenta. Após as correções, o aplicativo foi reavaliado e validado para a próxima etapa de aplicação direta em um ciclo de inspeções. Esse marco final permitiu uma validação inicial da ferramenta em condições reais de operação do sistema e possibilitou a disponibilização oficial às Gerências Regionais para os testes em campo no primeiro ciclo de inspeções de segurança regulares de 2026.



Figura 8 – Visita para a validação do aplicativo.

5. RESULTADOS

O aplicativo "*Checklist* Barragens" foi validado pelos profissionais que atuam na Gestão de Segurança de Barragens, tanto pela equipe da Gesin quanto pelas equipes das Gerências Regionais. Os testes realizados pelas equipes das regionais aconteceram no primeiro ciclo de inspeções. Durante esse período, a Gesin recebeu devolutivas quanto à usabilidade do aplicativo.

O primeiro ponto limitante para a avaliação foi o período de aplicação nas Gerências Regionais, pois o primeiro ciclo acontece entre os meses de dezembro e janeiro, entretanto só foi possível a disponibilização do aplicativo em janeiro. Isso reduziu a possibilidade de barragens passíveis de testes, visto que algumas Gerências Regionais já haviam iniciado a aplicação dos *checklists* em dezembro. Mesmo com essa limitação, a Gesin optou pela utilização da ferramenta por se tratar justamente de uma fase experimental, na qual a avaliação das equipes das regionais era de grande importância.

O segundo ponto a considerar é que os testes foram realizados nos celulares pessoais dos usuários, podendo haver discrepâncias de uso em razão das diferentes especificações técnicas dos aparelhos. Há também o fator limitante do sistema operacional, uma vez que, neste momento, o aplicativo só pode ser usado em dispositivos *Android*.

Dessa forma, a adesão parcial observada não deve ser interpretada exclusivamente como baixa aceitação da ferramenta, pois esteve associada a fatores operacionais, como a disponibilização do aplicativo com o ciclo já em andamento, o uso de aparelhos pessoais e a restrição inicial ao sistema *Android*.

Além dos pontos relatados durante as inspeções, a Gesin elaborou uma pesquisa para os usuários através do *Google Forms* com o intuito de avaliar a usabilidade e o desempenho da ferramenta. O questionário foi respondido pelos usuários que participaram da aplicação experimental do aplicativo nas Gerências Regionais e na equipe da Gesin. As respostas foram utilizadas para avaliar a percepção dos usuários quanto à experiência de uso, desempenho, funcionalidade e impacto da ferramenta.

O instrumento consistiu em um questionário rápido, formulado com 9 (nove) perguntas objetivas e 2 (duas) subjetivas. A avaliação utilizou escala linear, na qual os usuários pontuaram de 1 (um) a 5 (cinco), considerando os eixos da "Experiência do Usuário", "Desempenho e Funcionalidade" e "Satisfação e Impacto" com o aplicativo.

O aplicativo foi empregado em 39 das 86 barragens elegíveis da Cogerh, o que corresponde a aproximadamente 45% do total previsto para o ciclo. Dessa forma, a satisfação geral reflete a avaliação conjunta dos critérios considerados no questionário.

Entre as 39 aplicações avaliadas, a satisfação geral concentrou-se nas notas 3, 4 e 5. A nota 5, correspondente a "muito satisfeito", foi registrada em 18 aplicações (46%); a nota 4, correspondente a "satisfeito", em 8 aplicações (21%); e a nota 3, correspondente a "regular", em 13 aplicações (33%). Não houve registros de notas 1 e 2, correspondentes a "muito insatisfeito" e "insatisfeito", que indicariam satisfação abaixo do esperado. Já nas demais 47 barragens, equivalentes a aproximadamente 55% do total elegível, o aplicativo não foi utilizado nesse ciclo.

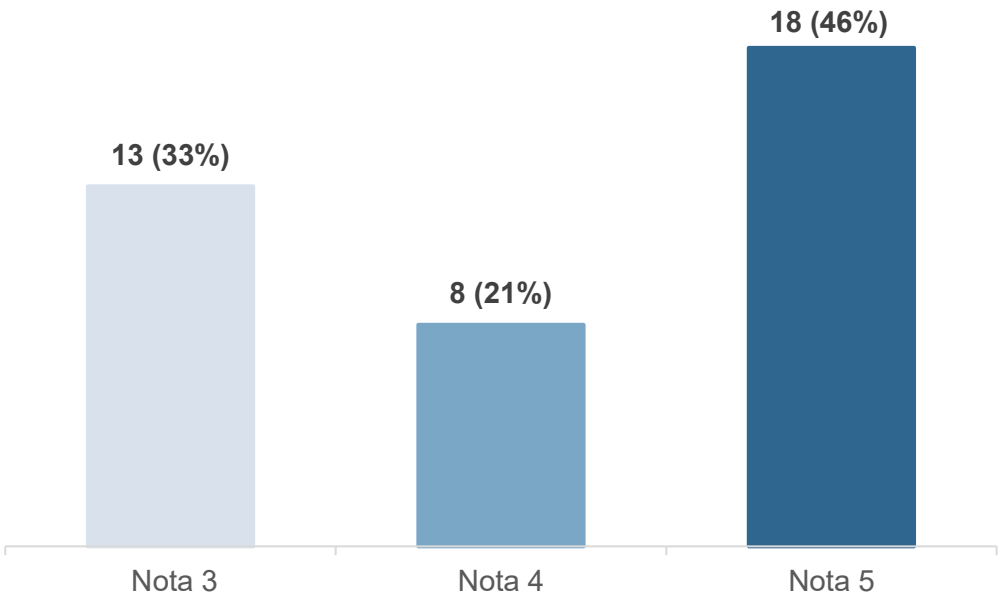


Gráfico 1 – Avaliação da satisfação geral nas barragens com uso do aplicativo (n = 39).

Em termos operacionais, a ferramenta indicou redução do intervalo entre a inspeção em campo e a disponibilização dos dados no Sigerh. Antes da utilização do aplicativo, esse processo dependia do preenchimento manual em campo e posterior transcrição para o sistema. Com o aplicativo, o envio das informações passou a ocorrer após a sincronização dos dados, conforme a disponibilidade de conexão com a *internet*.

Além da avaliação linear, os respondentes apontaram sugestões de melhorias no campo de *feedback* aberto. Essas contribuições indicam principalmente funcionalidades a serem incorporadas, como o georreferenciamento das fotos registradas nas barragens, a inserção de marcações visuais, como setas e círculos, para destacar as anomalias nas imagens, e melhorias na interface e no fluxo de preenchimento do *checklist*. Tais ajustes podem tornar o uso do aplicativo mais simples e ágil em campo e orientar o aprimoramento das próximas versões do aplicativo *Checklist* Barragens.

6. CONCLUSÕES

Os resultados da aplicação experimental indicam que o aplicativo *Checklist* Barragens apresenta potencial para apoiar as Inspeções de Segurança Regular da Cogerh. A possibilidade de preenchimento *offline*, armazenamento local das informações, registro fotográfico das anomalias, cálculo automático do produto GUT e integração posterior ao Sigerh contribui para reduzir retrabalho, proteger os dados coletados e tornar o fluxo de inspeção mais ágil e padronizado.

Apesar da adesão parcial no primeiro ciclo de testes, associada principalmente a limitações operacionais, como a disponibilização da ferramenta com o ciclo em andamento, o uso de aparelhos pessoais e a restrição inicial a dispositivos *Android*, a avaliação dos usuários indicou boa aceitação inicial do aplicativo. Durante a inspeção,

seu funcionamento no modo *offline* facilita o acesso às informações e confere maior agilidade ao processo. Considerando que muitas barragens estão localizadas em áreas com baixa ou inexistente cobertura de *internet* móvel, a funcionalidade *offline* representa um dos principais diferenciais da ferramenta, pois permite o preenchimento integral do *checklist* em campo e o envio posterior das informações quando houver conexão. A utilização da ferramenta demonstrou capacidade de reduzir o intervalo entre a coleta das informações em campo e sua disponibilização no sistema institucional, favorecendo maior agilidade na análise técnica e na tomada de decisão.

As sugestões apresentadas pelos respondentes, especialmente quanto ao georreferenciamento das fotos, à inserção de marcações visuais nas imagens e ao aperfeiçoamento da interface e do fluxo de preenchimento, poderão orientar melhorias nas próximas versões. Dessa forma, o aplicativo contribui para consolidar um fluxo mais eficiente, seguro e integrado para a gestão das inspeções de segurança de barragens da Cogerh.

7. PALAVRAS-CHAVE

Aplicativo mobile; Segurança de barragens; Inspeção de segurança.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BRASIL. (2010) – Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília.

[2] BRASIL. (2020) – Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334/2010 e dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília.

[3] COGERH. (2025) – Manual para *Checklist* em Barragens de Terra. Fortaleza.

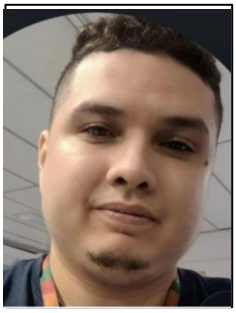
[4] COGERH. (2025) – Manual para *Checklist* em Barragens de Concreto. Fortaleza.

[5] COGERH. (2025) – Procedimento de Operação Padrão (POP). Instalação e primeira utilização do aplicativo “Checklist Barragem”. Fortaleza.



Brunna Cristina Almeida da SILVA

Possui graduação em Geografia, com especialização em Geoprocessamento e Análise em Recursos Hídricos pela Universidade Estadual do Ceará. Mestranda em Administração e Controladoria pela Universidade Federal do Ceará. É Analista em Gestão dos Recursos Hídricos da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará.

	**Mikaelle Duarte Mariano FEITOSA** Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade de Fortaleza, com especialização em Gestão de Projetos e em Segurança de Barragens. Mestranda em Administração e Controladoria pela Universidade Federal do Ceará. É Analista em Gestão dos Recursos Hídricos da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos e atualmente é Coordenadora de Segurança de Barragens.
	**Marcos Wesley Araujo LIMA** Formado em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Faculdade Integrada do Ceará (FIC), com atuação na área de tecnologia da informação desde 2010. Possui experiência como Analista de Sistemas, Desenvolvedor *Full Stack* e Líder Técnico, liderança técnica de equipes, definição de arquiteturas e soluções voltadas para performance, escalabilidade e qualidade de *software*.
	**Fernando Cordeiro de FREITAS** Graduado em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Estácio Fortaleza e pós-graduando em Desenvolvimento de Aplicativos Móveis pela PUCPR. Integrante da equipe de TI da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), onde atua como Desenvolvedor *Mobile*.
	**Otacilio Correia Lima NETO** Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC) com Mestrado em Engenharia Civil na Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). É Analista em Gestão dos Recursos Hídricos da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (Cogerh).

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.4
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

Proposta de um sistema de execução assistida de PAE para monitoramento de incidentes em barragens e aviso à população

Alan Petrônio Pinheiro
Engº Dr - Universidade Federal de Uberlândia

Márcio Augusto Reolon Schmidt
Engº Dr - Universidade Federal de Uberlândia

Carlos Eduardo Melo de Sousa
Engº - Empresa Metropolitana de Águas e Energia

RESUMO

Incidentes com barragens podem ter relevantes impactos e não são tão incomuns. No Brasil, por exemplo, as barragens devem seguir as orientações de um PAE (Plano de Ação de Emergência) que orienta procedimentos para tratar e monitorar eventos. Contudo, um monitoramento eficiente começa na identificação prematura do evento, somado a ferramentas computacionais que possam ajudar a automatizar a coordenação das ações de respostas e avisos à população. Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo desenvolver uma tecnologia computacional com o propósito de automatizar as ações do PAE e permitir o monitoramento de eventos em barragens, desde sua identificação, até o processo de emissão à população potencialmente afetada, alertas por mensagens de celular. Para isto, o sistema foi estruturado em três etapas. A primeira delas diz respeito a um sistema de IA que analisa sensores piezômetros para fazer predição de valores, com até 1h de antecedência, com base nas últimas medidas. A segunda etapa, que só acontece com a confirmação do evento, trata-se de um sistema especialista capaz de executar um plano de ação automaticamente, executando ações segundo sua programação, porém de maneira automática. O sistema age como um “supervisório de eventos” dando suporte aos seus operadores (na sala de emergência) durante a ocorrência do evento. Na terceira fase, se o evento atingir níveis críticos, um algoritmo de triangulação de torres conecta-se a uma operadora de telefonia móvel. Esta conexão permite listar os números de telefones (sem identificação das pessoas) celulares presentes nas áreas das torres afetadas, independente de cadastro prévio. De posse destes números, o sistema pode enviar mensagens de WhatsApp de aviso. Estas mensagens podem ter links para mapas da área afetada ou lista de pontos de encontro.

ABSTRACT

Dam incidents can have significant impacts and are not uncommon. In Brazil, for example, dams must follow the guidelines of an Emergency Action Plan (EAP) that outlines procedures for handling and monitoring events. However, efficient monitoring begins with the early identification of the event, coupled with computational tools that can help automate the coordination of response actions and

warnings to the population. In this context, this research aimed to develop a computational technology to automate the actions of the EAP and allow the monitoring of dam events, from their identification to the process of issuing alerts to the potentially affected population via cell phone messages. To this end, the system was structured in three stages. The first stage involves an AI system that analyzes piezometer sensors to predict values up to 1 hour in advance, based on the latest measurements. The second stage, which only occurs upon confirmation of the event, is an expert system capable of automatically executing an action plan, carrying out actions according to its programming, but in an automated manner. The system acts as an "event supervisor," supporting its operators in the emergency room during the event. In the third phase, if the event reaches critical levels, a tower triangulation algorithm connects to a mobile phone operator. This connection allows listing the phone numbers (without identifying individuals) present in the areas of the affected towers, regardless of prior registration. With these numbers, the system can send warning WhatsApp messages. These messages may contain links to maps of the affected area or a list of meeting points.

1. INTRODUÇÃO

Embora relativamente raros, incidentes com barragens tem grande potencial para impactos desastrosos à vida humana. No Brasil, a história recente tem corroborado com esta afirmação [1]. No entanto, a identificação de eventos (potencialmente danosos) em barragens não é trivial e a gerência e contingência de tais eventos, exige uma forte coordenação entre equipes e estudo prévio bem elaborado. Ainda, quando estas contingências não são suficientes, surge a necessidade de avisar - o quanto antes possível - a maior quantidade de pessoas que podem ser potencialmente impactadas. Todo este processo é muito complexo, mas necessário, visando assegurar a proteção humana de pessoas na região impactada.

Para tratar a complexidade descrita, alguns autores [2] propuseram um sistema de IoT de hardware e software para ler dados da barragem (nível água) e acionar alarmes locais. Outros autores [3], focaram mais seus esforços na construção de sensores distribuídos e tecnologia Zigbee para obter dados e predizer o estado da barragem. Já outras abordagens [4] utilizam inferência Fuzzy para prever riscos de enchentes e comportamentos futuros de esforços em barragens e reservatórios de hidrelétricas.

Todavia, um efetivo e completo sistema deve ir muito além do monitoramento e inferência de eventos. Ele deve prover meios para executar de forma mais rápida e assertiva possível uma sequência de procedimentos que visam gerenciar o evento em questão. Penando nisto, a ANA (Agência Nacional de Águas) propôs de maneira que barragens, que tenham potencial de atingir populações, possuam um “Plano de Ação de Emergência (PAE) [5] para identificar ações mitigantes e orientações objetivas para os cenários de incidentes previstos para o PAEs. Nele, é feita uma série de sugestões e estudos da barragem que visam criar fluxos de notificações e procedimentos de tratamento de eventos que visam antever as ações necessárias, na forma de um fluxograma, que um empreendedor deve tomar para gerenciar eventos na barragem e fazer as comunicações necessárias, evitando impactos mais desastrosos. Em alguns casos, como na capital do estado de São Paulo, tem-se barragens dentro da cidade que, se colapsadas, tem impacto de atingir milhões de pessoas. E mecanismos tradicionais, como sirenes, não são viáveis. Portanto, este cenário exige um modelo de ferramenta de aviso mais adaptada a cenários como o aqui exemplificado.

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é propor uma metodologia computacional, envolvendo elementos de *hardware* e *software*, como ferramenta para supervisionar eventos em barragens, buscando otimizar a identificação de eventos e acelerar o processo de aviso das populações afetadas. Este sistema implementa uma metodologia que automatiza todo o processo proposto pelo PAE envolvendo deste a identificação de eventos, através de sensores, até o aviso de grandes populações através de envio automatizado de mensagens de WhatsApp usando para isto um procedimento de triangulação de torres/ERBs.

2. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

A concepção do sistema é dividida em três etapas, conforme revela a Figura 1. A primeira etapa é composta com um *hardware* de medição e comunicação que mede níveis de água infiltrada na estrutura da barragem através de sensores piezômetros.

Uma inteligência artificial é também usada para predizer o nível da água infiltrado. Associado a isto, um algoritmo de CEP (*complex event processing*) é executado continuamente para identificar uma condição que pode indicar um evento. A função da etapa 1 é identificar antecipadamente um evento na barragem (e previsto no PAE) e avisar um responsável pela barragem e obter autorização (dele) para eventualmente prosseguir para a segunda etapa.

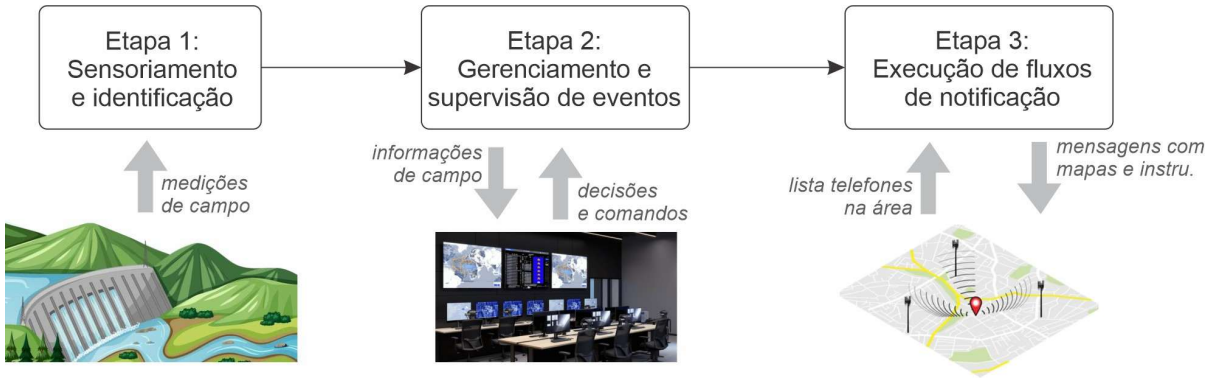


Figura 1 – Etapas em que a metodologia proposta foi implementada para tratar o problema.

Na etapa 2, um sistema supervisório construído nesta pesquisa é executado em um servidor web. Este sistema, chamado de SAE (Sistema de Avisos e gerenciamento de Eventos), exibe em sua tela o plano de ação pré-cadastrado e associado aquele evento, dando ao operador da sala de emergência poderes para executar as etapas e monitorar seu efeito. É um supervisório, só que voltado a eventos e não a medições, como fazem os supervisórios tradicionais.

Na terceira e última etapa, o sistema se conecta a uma operadora de telefonia e através de uma VPN tem a capacidade de solicitar a ela os números de telefone (sem identificação das pessoas, para fins de privacidade) de uma área. Os números são filtrados por um algoritmo de triangulação para tentar identificar as pessoas que estão dentro da área afetada pelo evento. Em seguida, de posse dos números filtrados, envia mensagens de WhatsApp a estes contendo informações sobre o evento e até mesmo *link* para acesso aos mapas de área de mancha, orientando-as a sair. As próximas subseções detalham estas três etapas.

2.1 - Etapa 1: sensoriamento e identificação de eventos

A Figura 2 ilustra os principais passos que constituem a etapa 1. Um *datalogger*, também construído nesta pesquisa, faz as medições de nível de água da estrutura da barragem. No exemplo aqui usado, ele envia dados através de uma rede pública 5G para facilitar o uso da solução em locais com pouca infraestrutura de TI própria. Na etapa 1a (ver Figura 2), um *software proxy* de rede 5G apenas faz a conexão de *socket* TCP/IP com o *datalogger* usando a rede móvel. Ele funciona de modo "transparente" para o sistema, uma vez que sua função é apenas manter o canal de *socket* aberto entre o *datalogger* e o servidor modbus cliente da etapa 1b. O servidor modbus usado aqui é o [6]. A taxa de leitura padrão é configurada para 1 medida a cada 15 minutos.

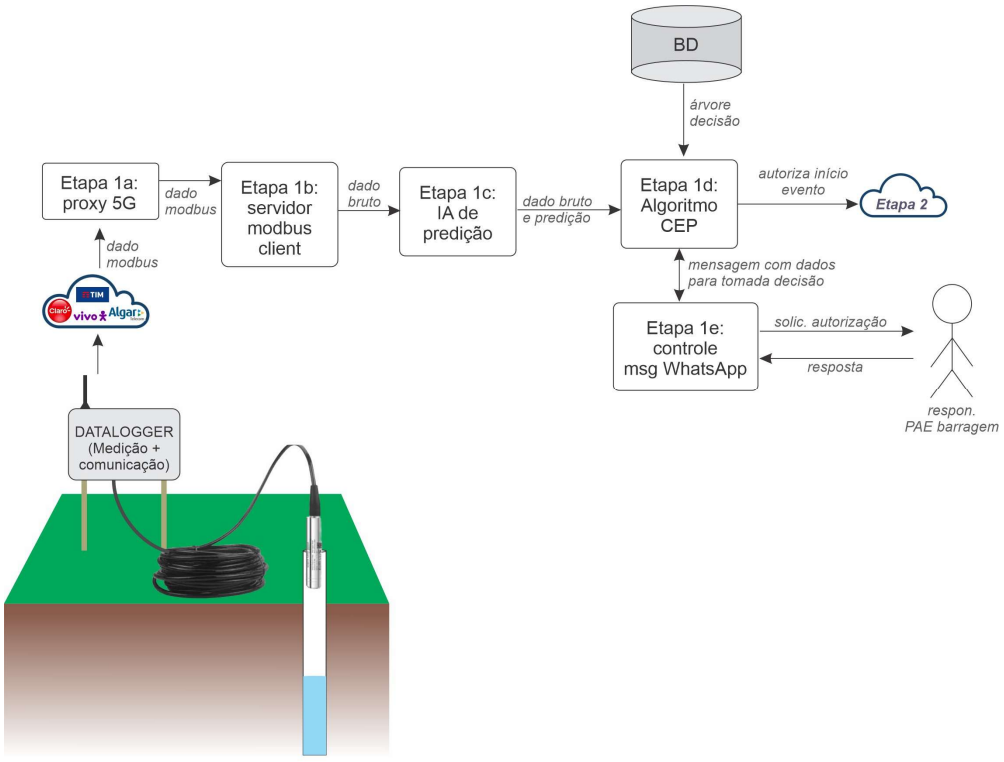


Figura 2 – Sub-etapas que compõem a etapa principal de “sensoriamento e identificação de eventos”.

Na etapa 1C, um algoritmo de IA [7] aplica um sistema de predição de séries temporais para tentar predizer o valor de nível da água para o horizonte de 1 hora. O algoritmo de predição emprega uma moderna rede neural multi-camadas baseada na representação de Kolmogorov-Arnold (KANs) para predizer a série temporal de medidas de nível da água em um horizonte de predição. O valor padrão aqui empregado é de 1h (ou 4 amostras de 15 minutos cada). Essencialmente, como visto na Figura 3, ela tem que pegar a medida atual do sensor piezômetro equivalente, e pelo menos as últimas 36 medidas anteriores para formar a série histórica temporal. Ela é injetada, tratada (normalizada e particionada em segmentos) e redes neurais KAN tentam, depois de treinadas, produzir segmentos. Estes segmentos são então reconstituídos, gerando uma série temporal predita para as próximas 1h (ou seja: 4 pontos de medição).

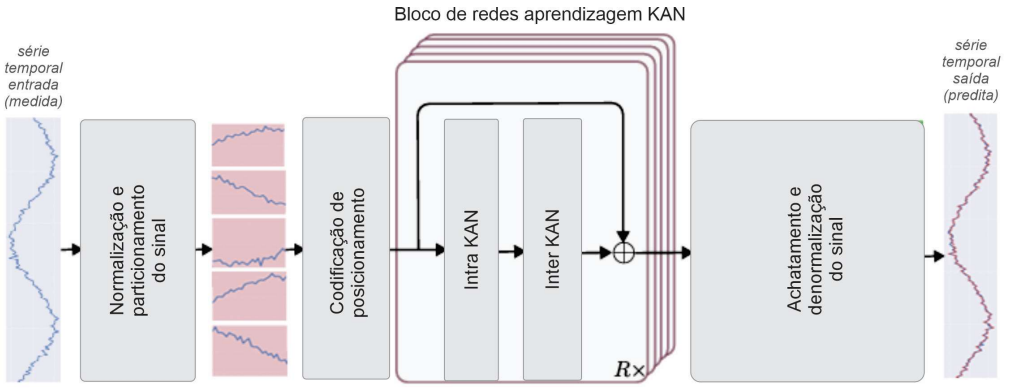


Figura 3 – Arquitetura base da rede neural artificial baseada em KAN para predição de séries temporais de medidas de piezômetro. Baseado em [7]

Na “etapa 1d – Algoritmo CEP” (ver Figura 2), estes dados são avaliados segundo uma programação, feita na forma de árvore de dados. A ideia é verificar se as medidas atendem aos critérios de confirmação do evento, segundo a programação desta árvore de dados. A Figura 4 ilustra o algoritmo usado para confirmar se um evento está acontecendo ou não. Conhecido como algoritmo CEP, é empregado para executar a árvore de decisão e verificar se suas condições são atendidas. E quando são, a árvore manda uma mensagem instantaneamente para o responsável pelo PAE da barragem avisando a ele que as condições daquele evento determinadas pela árvore de decisão foram identificadas. Nisto, pede confirmação ao destinatário se ele confirma se o evento associado está acontecendo. Se o usuário responder positivamente, o sistema segue para e etapa 2 (da Figura 1). Caso contrário, ele identifica que é um falso positivo e que o evento não deve acontecer. Desta forma, este sistema automatiza o monitoramento das variáveis, mas deixa para um usuário humano tomar e decisão se é pertinente ou não o evento. Observe que a avaliação pode ser feita com os valores preditos e, por isto, o sistema tenta antecipar algum acontecimento na barragem, que reflita nos valores de piezômetro, antes mesmo que ele aconteça.

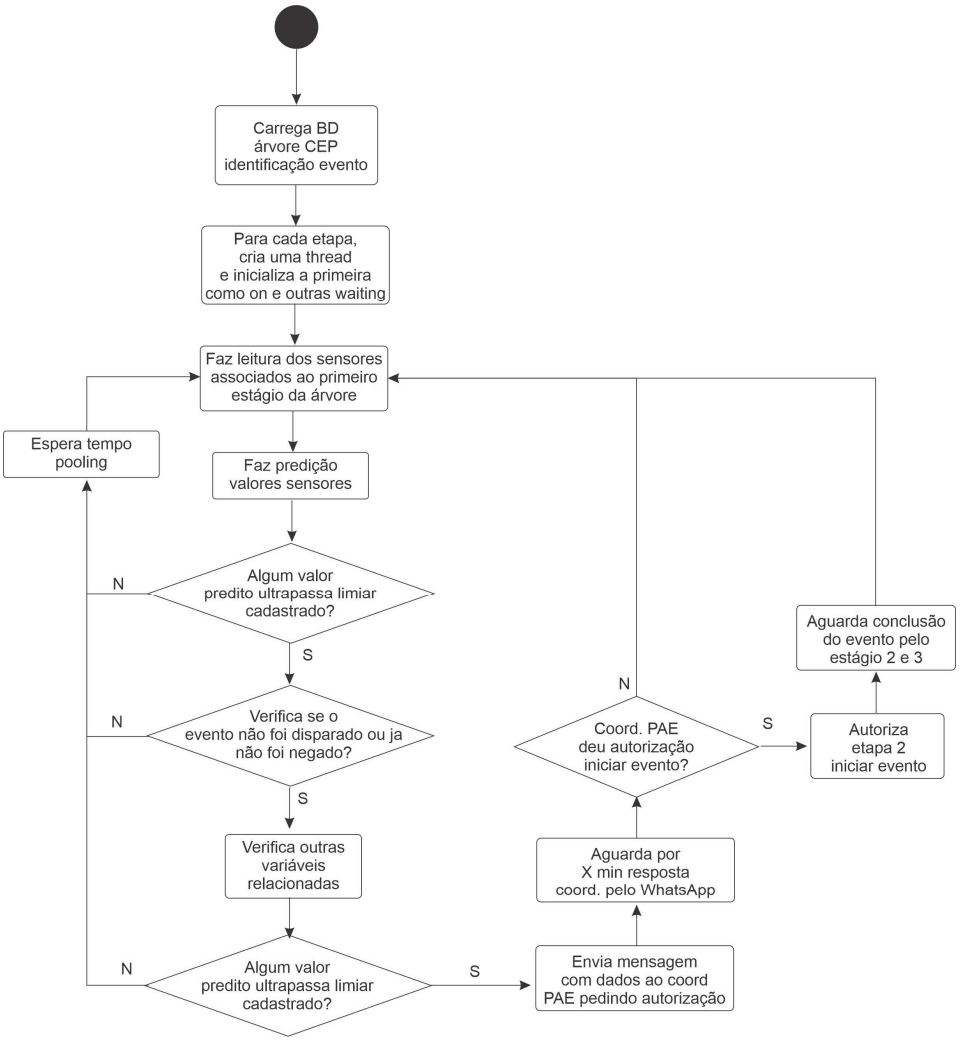


Figura 4 – Algoritmo do CEP usado para executar as árvores de decisão em tempo real periodicamente para identificar se um dado evento pode estar prestes a acontecer, com base em uma determinada leitura de um conjunto de sensores e variáveis.

A Figura 5 ilustra a interface gráfica do módulo CEP. Nela são exibidas as árvores de decisões em execução e os eventos já autorizados por coordenadores de barragens. Todos os eventos acessíveis – de maneira independente – podem ser acessados pela sala de emergência a partir desta plataforma.

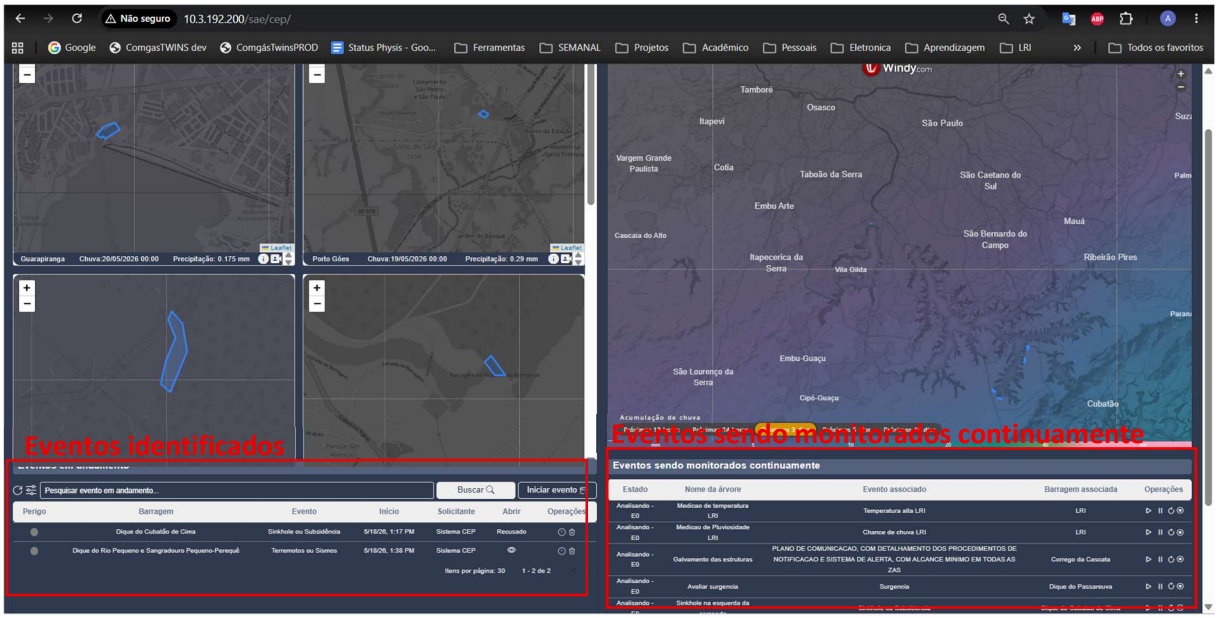


Figura 5 – Interface gráfica do módulo CEP para supervisionamento. Nela se observa (porção direita inferior) a lista de árvores CEP de cada um dos eventos sendo executadas. Na tabela da esquerda tem-se os eventos em execução que foram autorizados

2.2 - Etapa 2: sistema de gerenciamento de eventos e planos de ação

Esta segunda etapa tem por finalidade oferecer ao seu usuário, de forma supervisória, uma interface gráfica que permita aos operadores da sala de emergência acompanharem e intervirem na execução do plano de ação previamente cadastrado. A Figura 6 ilustra o exemplo de uma interface de monitoramento de um evento simulado e identificado pela Etapa 1.

Para executar o plano de ação, foi projetado um algoritmo que lê o JSON que representa o cadastro do plano de ação e executa cada um de seus galhos. Cada tarefa no plano de ação representa uma *thread*, e por isto o sistema é altamente paralelo. Mas a execução de uma *thread* (ou folha da árvore) depende se o nó antecessor foi executado. Por isto, existe uma alta coordenação entre os estados de cada *thread*. A Figura 7 descreve o algoritmo que lê cada folha da árvore que representa o plano de ação. Cada atividade deve pertencer a uma das categorias de ações que o sistema consegue construir: (i) envio de um fluxo de notificação; (ii) acionamento de algum dispositivo; (iii) atribuir lista de atividades; (iv) ler algum indicador; (v) gerar mapa de mancha; (iv) solicitar estimativa ocupação de área; (v) reavaliar cenário e aguardar decisão usuário; (vi) definir início de cenário e (v) encerramento de cenário ou plano de ação.

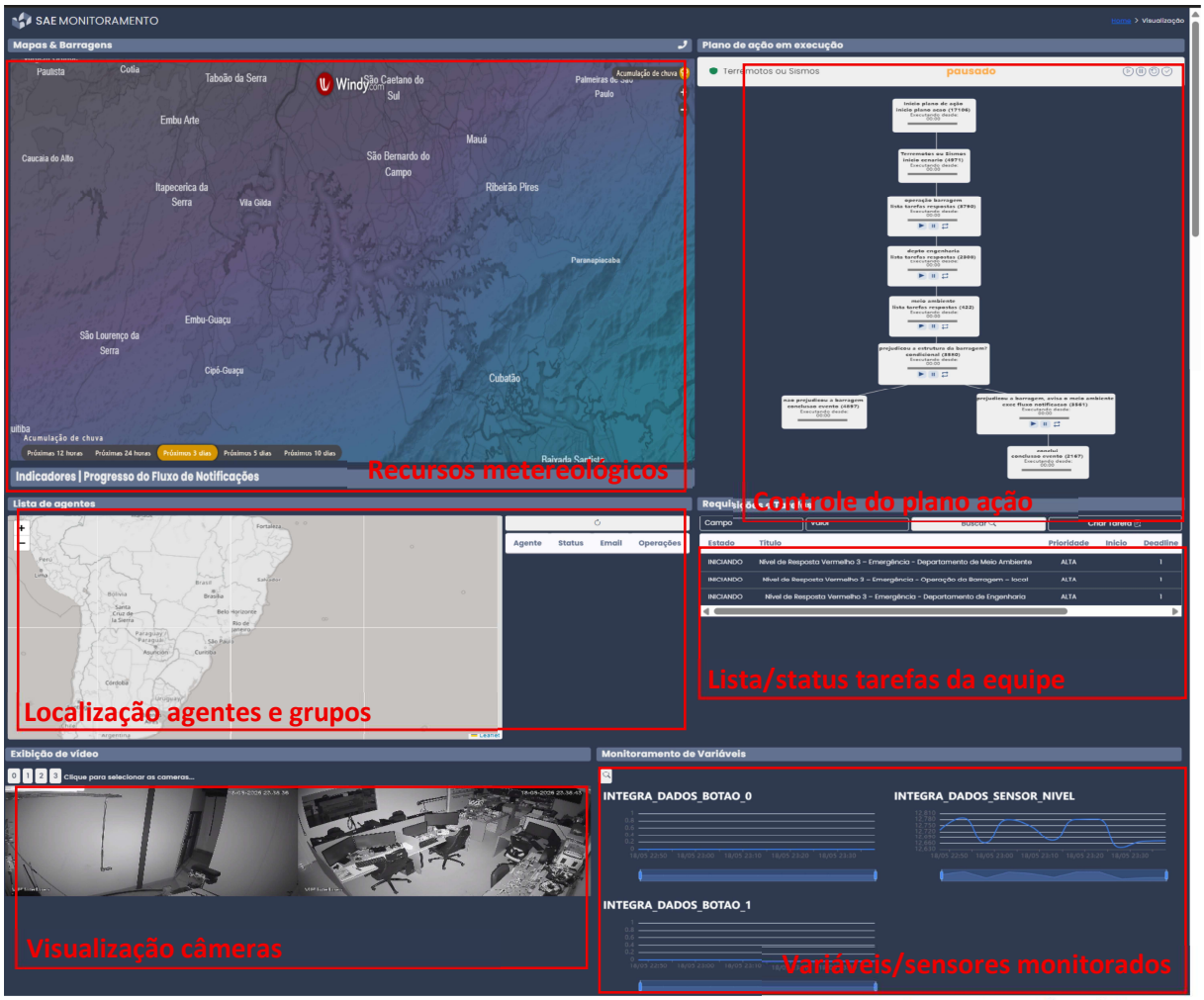


Figura 6 – Interface gráfica supervisória do sistema que executa o plano de ação. Observe que cada ação é exibida como um quadrado em uma árvore que pode ser controlado (botões de play/pause).

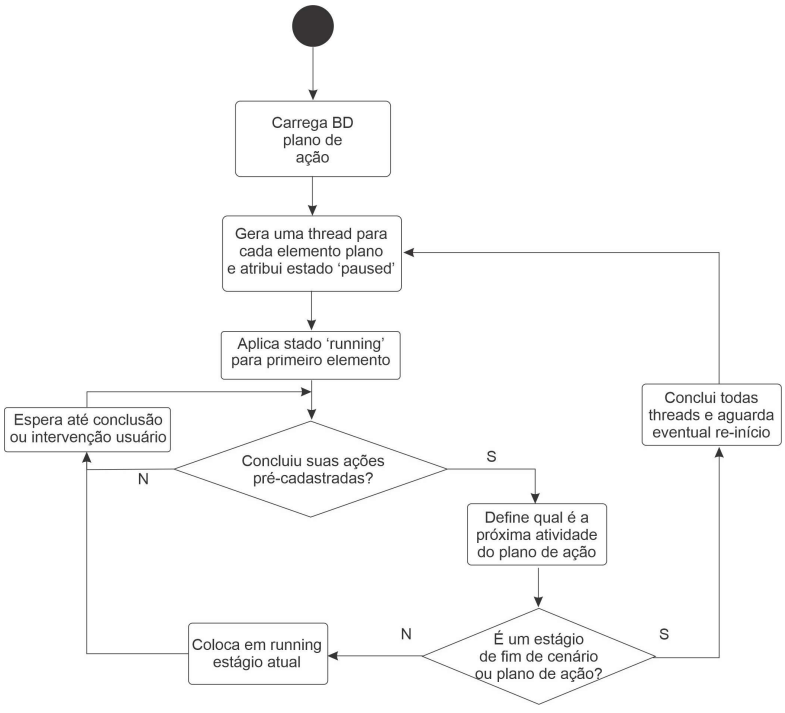


Figura 7 – Algoritmo da Etapa 2 usado para executar cada uma das atividades no plano de ação.

2.3 Etapa 3: sistema de aviso e triangulação de torres de telefonia

Sendo necessário avisar grandes massas de população, este sistema adotou uma estratégia diferente, a nível de teste e prova de conceito: conectar-se ao *backbone* de operadoras de telefonia e solicitar das ERBs (estações rádio base) presentes na região afetada pela área de mancha, os números de telefones das pessoas que estão conectadas naquela área. Para evitar ferir a LGPD (lei geral de proteção de dados), é requisitado apenas os números de telefone e a potência do sinal que chega à ERB. Ainda assim, os números nunca eram armazenados após o envio da mensagem de alerta. A ideia é que qualquer pessoa, independente de cadastro prévio, receba a mensagem – se ela estiver dentro da área potencialmente afetada - entendendo que ela é de utilidade pública. A mensagem é enviada via WhatsApp ou SMS. Portanto, todas pessoas portando celular e conectados à internet podem receber informações do evento e *links*.

Os testes foram realizados na cidade de Uberlândia (MG) com um grupo de pessoas previamente selecionados que autorizaram participar do experimento. Por questões legais, o sistema foi integralmente usado apenas neste grupo de pessoas e o filtro aplicado a este grupo de pessoas já aconteceu no sistema de *backbone* da operadora. A Figura 8 ilustra como é o processo de identificar os números em uma determinada área de mancha.

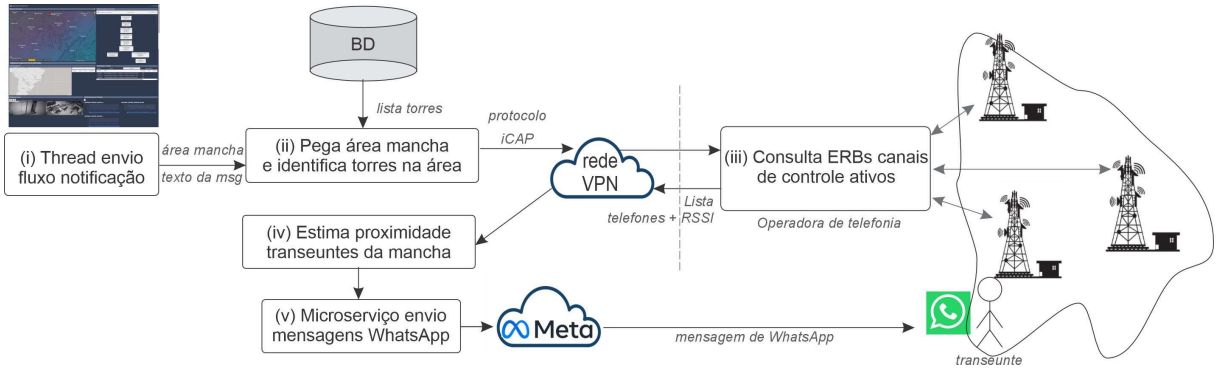


Figura 8 – Algoritmo da Etapa 2 usado para executar cada uma das atividades no plano de ação.

Observe que na fase (iv) da Figura 8 (“Estima proximidade transeuntes da mancha”), existe uma necessidade de se estimar a distância que cada usuário está da respectiva torre, para ter uma ideia se ele está próximo da área afetada. Destacando que a posição geográfica das torres (ou ERBs) são publicamente bem conhecidas. Desta forma, foi usada a equação de Friis para estimar a distância entre a antena da ERB e a antena do receptor celular, conforme Equação (1).

$$d = \frac{1}{\lambda}\sqrt{\frac{P_t . A_r . A_T}{Pr}} \qquad (1)$$

Neste caso, a potência recebida Pr, é estimada pela própria ERB e enviada junto com o número do celular, através do KPI (*key parameter indicator*) de rede RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) e é dado em dBm. O valor de Pt é considerado como constante e também fornecida pela ERB. Ambos dados em dBm. O valor de λ também é uma constante da ERB e associado a frequência de transmissão. Este dado é público da ERB. Os valores de Ar e At são os ganhos de antena em relação a um

radiador isotrópico. No caso de A_T, foi considerado o valor de 3 dBi. O valor de A_R é um parâmetro da ERB que também pode ser consultado.

3. TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 - Testes de validação

Para promover testes básicos de validação funcional do sistema, foram definidos dois testes, a saber:

- Teste 1 – análise preditiva de identificação de eventos com base leituras piezômetro: neste caso, para verificar se o sistema realmente consegue fazer as leituras de piezômetros e fazer uma predição do valor do nível da água antes que de fato ele chegue a um valor tolerável (que possa caracterizar o evento), foi construído em laboratório um setup como o mostrado na Figura 9. Nele, tem-se um piezômetro ligado em tempo real ao nosso sistema por uma rede ethernet local. Uma bomba infusora foi usada para injetar água no tudo do piezômetro a uma razão de 1,0 cm/minuto. O *datalogger* foi configurado para fazer 1 medida/minuto e o sistema foi configurado para fazer um horizonte de predição de 5 amostras. Ou seja, toda vez que chegar uma medida do *datalogger*, ele tenta estimar qual seria o valor das cinco próximas medidas (ou melhor: como o nível da água se comportaria 5 minutos depois esta última medida). As 36 primeiras medidas realizadas, logo depois do início do teste, são usadas para iniciar o sistema de predição. Neste período, ele não faz predições.

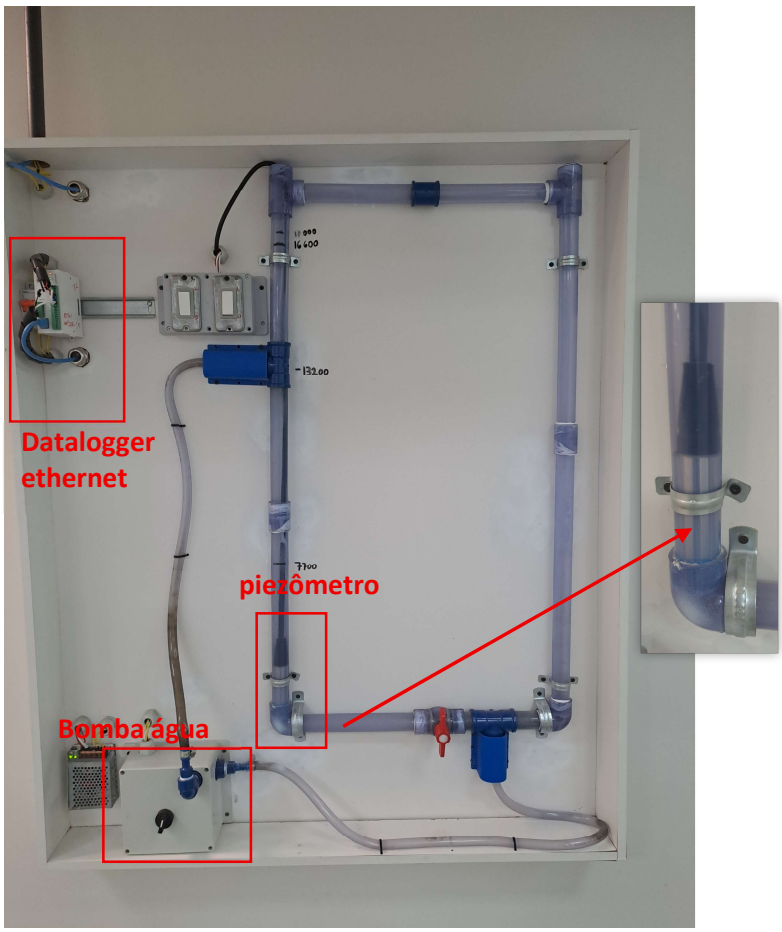


Figura 9 – Setup de um sistema eletrônico que controla o nível da água e um *datalogger* que faz leituras constantes e as envia para o sistema aqui proposto.

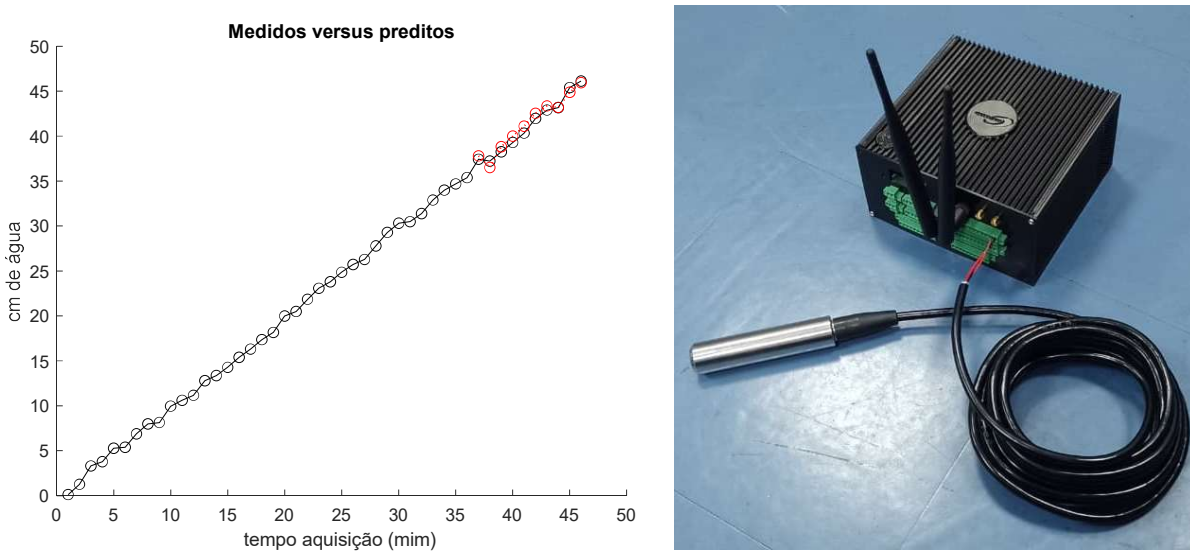
- Teste 2 – análise de funcionabilidade para gerência de eventos e emissão de alertas: para verificar a eficácia do sistema na execução de um plano de ação, foi criado um modelo de referência de um evento simples de enchente na cidade de Uberlândia. Neste modelo, o sistema mais uma vez mede um piezômetro (mesmo da Figura 9) de 1m de nível da água controlado (o nível de água dele é controlado com resolução de 1mm de água). E quando a sua predição alcança o valor de 10 cm de água, ele verifica se existe chuva em 1 estação meteorológica na cidade, para reconhecer o evento fictício de "inundação". A Figura 10 mostra o plano de ação fictício para este evento. Foi definida uma área de mancha na cidade onde oito pessoas recrutadas nesta pesquisa foram posicionadas para eventualmente receberem mensagens e outras 2 pessoas, foram colocadas nas imediações da ERB, mas afastadas da mancha por pelo menos 400metros.



Figura 10 – Plano de ação hipotético para análise de funcionalidade do sistema.

3.2 - Resultados e discussões

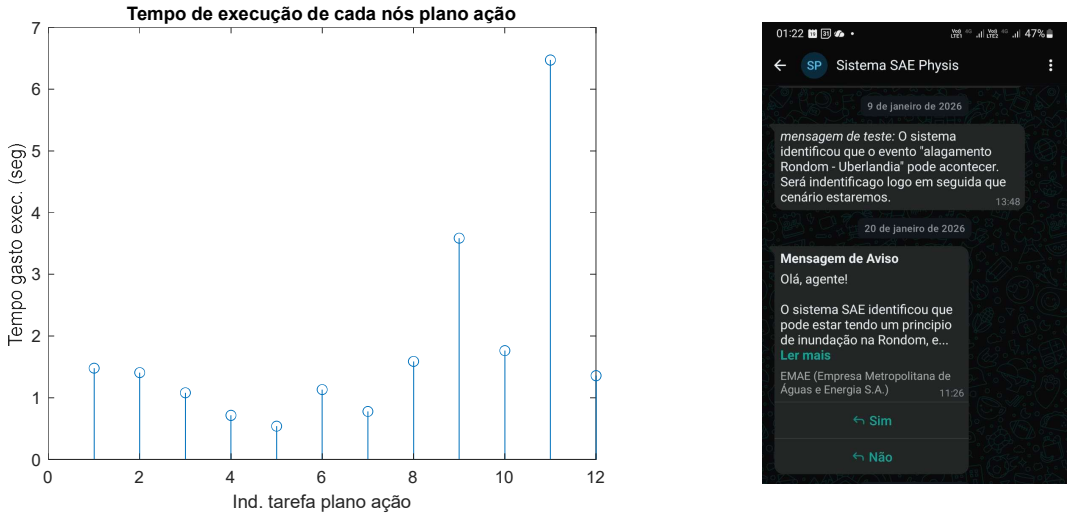
A Figura 11(a) exibe graficamente o resultado das medidas feitas pelo *datalogger* e as geradas pelo evento de enchimento do tubo de água com o piezômetro. Nos pontos em vermelho do gráfico, observa-se que (minutos depois) o valor de predição e o de medição são bem próximos, sugerindo que de fato o sistema foi capaz de identificar antecipadamente o aumento do nível da água. Isto é o esperado uma vez que - como descrito no setup deste experimento - havia um motor jogando uma quantidade de água constante. Portanto, este é um evento altamente determinístico e, por isto, de boa previsibilidade. Este teste foi repetido outras quatro vezes e neles os resultados eram equivalentes ao já exibido.



(a) (b)

Figura 11 – (a) Resultados do teste 1 de validação da predição do evento. Em vermelho, as amostras preditas após 36 medições acumuladas para gerar a série temporal. (b) Imagem do datalogger construído para esta pesquisa.

Já o teste 2 foi registrado o tempo de latência de cada uma das atividades previstas. Ele foi medido pelo próprio computador usando funções “get_tick()” de precisão. E como pode se observar nos valores exibidos na Figura 12a, os tempos de execução das tarefas são abaixo de uma dezena de segundos. Foram omitidos os tempos dos cenários “Re-avalia cenário X” e “Avalia cenário”, uma vez que estes dependem de entrada do usuário e por isto seu tempo é dependente de intervenção humana. Uma comparação entre a execução computacional e a manual não pode ser estabelecidas devido a grande diferença entre estes tempos e a grande variabilidade de tempo tomada para realização das atividades de forma manual. Já a Figura 12b ilustra o recebimento de uma mensagem WhatsApp por um dos participantes.



(a) (b)

Figura 12 – (a) Tempos de execução das atividades previstas no plano de ação no teste 2. (b) Ilustração de recebimento de mensagens de WhatApp.

No teste, todas as oito pessoas receberam mensagens, e uma das pessoas posicionadas próximo a área de mancha, mas fora dela, também recebeu mensagem, constituindo assim, um falso positivo. Provavelmente isto aconteceu porque os valores registrados de potência de sinal, quando aplicados a Equação (1), indicavam que o participante estava dentro da mancha porque a potência do sinal era forte. Um sinal de potência forte indica que a antena receptora está próxima da ERB. Situações como estas devem ser comuns, uma vez que o cálculo de distância é apenas uma estimativa sujeita a grandes erros de estimação.

De todo modo, ambos os testes realizados, e suas respectivas repetições, indicam um sistema funcional e apto na tarefa de automatizar o PAE.

4. CONCLUSÕES

A ideia de um sistema supervisório para automação de plantas elétricas, industriais e automação já é antiga e válida. Neste sentido, a ideia aqui proposta de desenvolver um "sistema supervisório para eventos em barragem" focado na execução de um PAE foi testada em alguma medida para (i) identificação antecipada de eventos que repercutem nas medições de piezômetros e (ii) na automação das ações preconizadas em um PAE. Os resultados mostram latências acumuladas na ordem de segundos, confirmando que a iniciativa traz velocidade ao processo e automatismo além de potencialmente decrementar falha humana. Neste sentido, este artigo indica a validade da ideia e demonstra alguns benefícios da adoção de sistemas desta natureza com fins a segurança das populações potencialmente afetadas em caso de incidentes severos em barragens.

5. PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento barragens, PAE, comunicação em massas, segurança de barragens.

AGRADECIMENTOS

Este projeto foi financiado pelo programa de P&D da ANEEL através da EMAE sob o código 00393-0015/2022. Os autores também agradecem as preciosas contribuições técnicas e todo o suporte de pesquisa provido pela Algar Telecom. Adicionalmente, a Regina Alice de Souza Pires e Hélio Max Parpinelli.

1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Reportagem G1 do Jornal Nacional. 2019 – "Barragem da Vale se rompe em Brumadinho, MG". Disponível em: https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/bombeiros-e-defesa-civil-sao-mobilizados-para-chamada-de-rompimento-de-barragem-em-brumadinho-na-grande-bh.ghtml Data acesso: 17/5/2026.

[2] Kavitha R, Jayalakshmi C e K.Senthil Kumar (2018) – “Dam Water Level Monitoring and Alerting System using IOT”, International Journal of Electronics and Communication Engineering, vol. 5, pp. 19-22.

[3] Ali Akbar Siddique e M. Tahir Qadri (2020) – “Wireless sensor network (WSN) based early flood warning system”, International Journal of Information Technology, vol. 12, pp. 567–570.

[4] Wen-Tsai Sung, Ihzany Vilia Devi e Sung-Jung Hsiao (2022). "Early warning of impending flash flood based on AIoT", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking , vol. 15.

[5] Site da Agência Nacional de Água - “Manuais do empreendedor”. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/snisb/Entenda_Mais/volume-iv-guia-de-orientacao-e-formularios-dos-planos-de-acao-de-emergencia-2013-pae Data acesso: 14/7/2026.

[6] Biblioteca “libmodubs”. Código fonte no Github. Disponível em: https://github.com/stephane/libmodbus Data acesso: 17/5/2026.

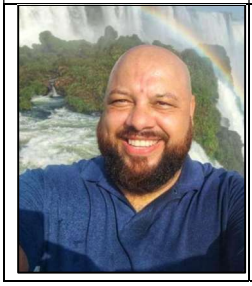
[7] Md Zahidul Hasan, A. Ben Hamza e Nizar Bouguila. “Time series forecasting with Hahn Kolmogorov-Arnold networks”, Cornell University, Machine Learning Files, 2026. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2601.18837 Data acesso: 17/5/2026.



Alan Petrônio PINHEIRO
Pesquisador doutor da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Faculdade de Engenharia Elétrica, é coordenador do Laboratório de Redes Inteligentes da UFU. Atua na área de P&D projetando sistemas computacionais complexos para o setor elétrico e de energia com foco em: medição/instrumentação, supervisão, controle, data analytics e inteligência artificial aplicada. Página pessoal: www.alan.eng.br. Contato: alanpetronio@ufu.br.



Márcio Augusto Reolon SCHMIDT
Mestre e Doutor em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná. Tem experiência na área de Geociências e Conservação, Geoprocessamento para planejamento regional, Visualização Cartográfica e Métodos Inteligentes em Sensoriamento Remoto. Pesquisa em Inteligência Artificial para GIS e Cartografia. É docente na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.



Carlos Eduardo Melo de SOUSA
Engenheiro Civil da Empresa Metropolitana de Águas e Energia, é responsável pelo setor de segurança de barragens da empresa, atuando como coordenador de PAE de mais de quinze barragens da empresa. Tem experiência na área de segurança de grandes estruturas de barragens e monitoramento.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.4
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO AUTOMÁTICA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE BARRAGENS DE BETÃO PARA APOIO NO CONTROLE DE SEGURANÇA ESTRUTURAL

Jorge Pereira GOMES
Investigador Principal - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RESUMO

A avaliação da resposta dinâmica das obras e a monitorização da evolução do seu comportamento ao longo das diferentes fases da sua vida útil assumem grande relevância, integrando as atividades de vigilância e controlo da segurança estrutural. Nos últimos anos, têm vindo a ser implementados sistemas de monitorização do comportamento dinâmico em várias barragens de betão construídas em Portugal. Para cada barragem foram desenvolvidos modelos numéricos, considerando o conjunto barragem–fundação–reservatório, os quais foram calibrados com base em resultados experimentais.
A presente comunicação apresenta a evolução dos sistemas de observação com a incorporação da monitorização dinâmica, metodologias de tratamento automático dos registos observados e emissão de possíveis avisos, comparação dos resultados experimentais com modelos numéricos desenvolvidos e ajustados a cada situação e previsões de evolução do comportamento estrutural da obra. Esta metodologia está a servir de base para a integração numa plataforma de apoio à decisão com incorporação de IA-explicativa e Gémeos Digitais Híbridos

ABSTRACT

The assessment of the dynamic response of structures and the monitoring of the evolution of their behaviour throughout the various phases of their service life are of paramount importance and constitute an integral part of structural safety surveillance and control. In the last few years, systems for monitoring dynamic behaviour have been installed in several concrete dams built in Portugal. For each dam, numerical models were developed considering the coupled dam–foundation–reservoir system and calibrated against experimental data.
The present communication addresses the evolution of dam surveillance systems through the integration of dynamic monitoring, automatic data processing methodologies for recorded responses and the generation of potential alert conditions, the comparison of experimental results with numerical models specifically developed and validated for each case, and the prediction of the future evolution of the structural behaviour of the dam under operational and seismic actions. This methodology is used as a basis for integration into a decision support platform incorporating explanatory AI (XAI) and Hybrid Digital Twin.

1 INTRODUÇÃO

As barragens de betão constituem infraestruturas críticas cuja segurança estrutural deve ser assegurada de forma contínua ao longo do seu ciclo de vida. Tradicionalmente, essa avaliação tem-se baseado em sistemas de observação que integram instrumentação destinada à medição de grandezas quasi-estáticas, como deslocamentos, deformações e pressões intersticiais. Embora estes sistemas sejam essenciais para o controlo do comportamento global das estruturas, apresentam limitações na caracterização da resposta a ações dinâmicas e na deteção precoce de alterações estruturais [1].

Nas últimas décadas, a evolução tecnológica ao nível dos sensores, sistemas de aquisição de dados e capacidade de processamento computacional tem permitido o desenvolvimento de sistemas de monitorização dinâmica com elevado grau de automatização. Estes sistemas possibilitam não apenas a aquisição contínua de dados, mas também o seu tratamento, análise e interpretação de forma praticamente autónoma, reduzindo significativamente a dependência de procedimentos manuais e aumentando a rapidez e fiabilidade da avaliação da segurança [2][3].

Neste contexto, a monitorização do comportamento dinâmico de barragens de betão assume particular relevância, uma vez que as propriedades dinâmicas da estrutura — nomeadamente frequências naturais, formas modais e coeficientes de amortecimento — são diretamente sensíveis a alterações na rigidez e das condições de fronteira. Assim, a sua identificação e acompanhamento ao longo do tempo constituem uma ferramenta eficaz para a deteção precoce de eventuais anomalias ou processos de degradação [4].

Apesar de Portugal se situar numa região de sismicidade moderada, a ocorrência de eventos sísmicos e a necessidade de garantir níveis elevados de segurança em grandes empreendimentos hidroelétricos justificam a implementação de sistemas específicos para a caracterização da resposta dinâmica, conforme recomendado em diretrizes internacionais para monitorização de barragens.

A principal evolução associada a estes sistemas reside na sua capacidade de operação automática, que abrange diferentes níveis do processo de monitorização: aquisição contínua de sinais, validação e armazenamento de dados, identificação automática de parâmetros dinâmicos e deteção de desvios face a padrões de referência. Esta automatização está na base das modernas abordagens de *Structural Health Monitoring* (SHM), nas quais algoritmos de processamento de sinal e técnicas de identificação modal são utilizados para extrair informação relevante a partir de grandes volumes de dados.

No domínio da identificação modal operacional, métodos como o Frequency Domain Decomposition (FDD) e o Stochastic Subspace Identification (SSI) têm sido amplamente utilizados na caracterização dinâmica de estruturas civis, incluindo barragens de betão. Em Portugal, diversos estudos têm demonstrado a aplicabilidade destas metodologias na monitorização de grandes estruturas, contribuindo para a melhoria dos processos de avaliação da segurança.

O presente artigo tem como objetivo analisar os sistemas de monitorização automática do comportamento dinâmico de barragens de betão, com particular enfoque na sua

aplicação em Portugal. São abordados os objetivos, a constituição e a operacionalidade destes sistemas, bem como as metodologias de tratamento e análise automática de dados, incluindo a deteção de anomalias e o apoio à decisão no controlo da segurança estrutural.

2 OPERACIONALIDADE DOS SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO DINÂMICA

2.1 Considerações iniciais

A operacionalidade dos sistemas de monitorização dinâmica de barragens de betão baseia-se numa cadeia integrada de aquisição, processamento, análise e interpretação de dados, suportada por um elevado grau de automatização. Esta evolução tem permitido a transição de sistemas essencialmente descritivos para plataformas capazes de fornecer, de forma contínua, indicadores quantitativos do comportamento estrutural.

Neste contexto, a monitorização dinâmica não se limita à recolha de sinais, mas envolve um conjunto de processos interligados que conduzem à transformação dos registos em informação útil para a avaliação da segurança estrutural. Estes processos incluem a aquisição e gestão de dados, o processamento automático de sinais, a identificação de parâmetros dinâmicos, a deteção de anomalias e a disponibilização de informação para apoio à decisão.

A operacionalidade dos sistemas de monitorização dinâmica pode ser representada sob a forma de uma sequência de processamento, na qual os dados adquiridos são progressivamente transformados em informação relevante para a avaliação da segurança estrutural (Figura 1). Este processo integra várias etapas, incluindo a aquisição e transmissão de dados, o processamento automático de sinais, a identificação de parâmetros dinâmicos, a deteção de anomalias e, finalmente, a disponibilização de informação para apoio à decisão. A automatização destas etapas constitui um elemento fundamental para garantir a eficiência, consistência e rapidez na interpretação dos dados



Figura 1 – Fluxograma do processamento automático de registos nos sistemas de monitorização dinâmica de barragens de betão

2.2 Aquisição, transmissão e gestão de dados

A aquisição de dados constitui a base de todo o sistema de monitorização dinâmica, sendo atualmente realizada através de redes de sensores que operam de forma contínua ou por ativação automática, dependendo do tipo de sistema considerado. Nos sistemas de monitorização dinâmica contínua, os registos são efetuados de forma permanente, permitindo capturar a resposta estrutural a excitações ambientais de baixa amplitude. Nos sistemas de observação sísmica, a aquisição é tipicamente condicionada por mecanismos de deteção de eventos, garantindo o registo de movimentos sísmicos relevantes sem necessidade de armazenamento contínuo de grandes volumes de dados.

Um aspeto fundamental nesta etapa é a sincronização temporal dos registos, geralmente assegurada através de sistemas baseados em GPS. Esta sincronização permite a análise coerente da resposta estrutural em diferentes pontos da barragem, sendo essencial para a identificação modal e para a avaliação da propagação de ondas sísmicas.

A definição da frequência de amostragem deve ter em consideração as características dinâmicas da estrutura, nomeadamente a gama de frequências de interesse associadas aos seus modos de vibração. Frequências de amostragem insuficientes podem conduzir à perda de informação relevante, enquanto frequências excessivamente elevadas implicam um aumento desnecessário do volume de dados.

Os dados adquiridos são transmitidos, em tempo real ou diferido, para sistemas centrais de armazenamento, onde são organizados em bases de dados estruturadas. Estas bases de dados desempenham um papel central na operacionalidade do sistema, permitindo a gestão eficiente da informação e a sua disponibilização para processamento automático. Nesta fase, são frequentemente implementados mecanismos de validação preliminar, destinados a identificar falhas de aquisição, interrupções de sinal ou comportamentos anómalos dos sensores.

2.3 Processamento automático de sinais

O processamento de sinais constitui uma etapa crítica na cadeia de monitorização, uma vez que a qualidade dos resultados obtidos depende diretamente da qualidade dos dados utilizados. Neste contexto, os sistemas modernos integram rotinas automáticas de pré-processamento destinadas a garantir a adequação dos sinais à análise dinâmica.

Estas rotinas incluem a remoção de componentes de baixa frequência associadas a deriva instrumental, a correção de *offsets* e a aplicação de filtros digitais que permitem isolar o conteúdo espectral relevante. A escolha dos parâmetros de filtragem deve ser cuidadosamente ajustada às características da estrutura e ao tipo de análise a realizar, de forma a evitar a eliminação de informação significativa.

Paralelamente, são implementados procedimentos de controlo de qualidade que permitem identificar e excluir registos afetados por ruído excessivo, falhas de sensores ou perturbações externas. Estes procedimentos baseiam-se, tipicamente, em critérios estatísticos e em indicadores de consistência dos sinais, sendo aplicados de forma automática a grandes volumes de dados.

Nos sistemas de monitorização contínua, é ainda necessário proceder à segmentação dos registos em intervalos temporais adequados à aplicação de metodologias de identificação modal. Esta segmentação permite garantir a estacionaridade dos sinais e melhorar a robustez dos resultados obtidos.

2.4 Identificação automática de parâmetros dinâmicos

A identificação modal operacional constitui o elemento central da análise em sistemas de monitorização dinâmica contínua, permitindo estimar as propriedades dinâmicas da estrutura a partir de excitações ambientais não controladas. Ao contrário dos ensaios modais clássicos, esta abordagem baseia-se exclusivamente na resposta da estrutura, não sendo necessário conhecer ou medir a excitação.

A aplicação de métodos de identificação modal permite determinar parâmetros fundamentais, como as frequências naturais, as formas modais e os coeficientes de amortecimento, que caracterizam o comportamento vibratório da barragem. Estes parâmetros são particularmente relevantes, uma vez que estão diretamente relacionados com a rigidez e com as condições de fronteira da estrutura, sendo, por isso, sensíveis a alterações estruturais. A determinação destes parâmetros é realizada através dos métodos *Covariance driven Stochastic Subspace Identification* (SSI–Cov) e *poly-Least Squares Complex Frequency Domain* (p-LSCF) já perfeitamente estabilizados para o caso da metodologia implementada nas barragens em Portugal. A implementação destes métodos em ambiente automático exige a definição de critérios robustos para a seleção dos modos físicos e para a rejeição de modos espúrios, constituindo um dos principais desafios na operacionalização destes sistemas.

A automatização do processo de identificação permite a obtenção sistemática de parâmetros dinâmicos ao longo do tempo, possibilitando a construção de bases de dados que refletem a evolução do comportamento estrutural.

2.5 Separação de efeitos ambientais e estruturais

A interpretação dos parâmetros dinâmicos obtidos requer a consideração explícita da influência de fatores ambientais, que podem induzir variações significativas nas propriedades identificadas sem que tal corresponda a alterações estruturais. Entre os fatores mais relevantes incluem-se a temperatura, o nível da albufeira e, em menor grau, outras variáveis associadas às condições de exploração.

A modelação destes efeitos constitui uma etapa fundamental para a definição de um comportamento de referência da estrutura. Esta modelação é frequentemente realizada com base em abordagens estatísticas, que permitem estabelecer relações entre os parâmetros dinâmicos e as variáveis ambientais. A utilização de modelos multivariáveis tem-se revelado particularmente adequada para capturar a complexidade destas relações [5][6].

A separação dos efeitos ambientais permite isolar a componente estrutural das variações observadas, reduzindo a probabilidade de interpretações erróneas e aumentando a sensibilidade do sistema à deteção de alterações efetivas no comportamento da barragem.

2.6 Deteção automática de anomalias

A deteção de anomalias baseia-se na análise dos desvios entre o comportamento observado e o comportamento de referência previamente definido. Este processo envolve a definição de critérios de decisão que permitam distinguir entre variações normais, associadas a fatores ambientais ou operacionais, e alterações potencialmente indicativas de problemas estruturais [7].

A implementação de algoritmos automáticos de deteção permite a monitorização contínua dos parâmetros dinâmicos e a identificação de situações em que são ultrapassados determinados limiares. Estes limiares podem ser definidos com base em critérios estatísticos, como intervalos de confiança ou limites de controlo, sendo ajustados em função da variabilidade dos dados.

As anomalias podem manifestar-se sob a forma de variações abruptas ou tendências progressivas nos parâmetros dinâmicos, sendo a sua deteção precoce essencial para a avaliação da segurança estrutural. A automatização deste processo permite uma resposta rápida e consistente, reduzindo a dependência de análise manual.

2.7 Difusão da informação

A informação resultante do processamento e análise dos dados é disponibilizada através de sistemas de visualização e reporte que permitem o acompanhamento do comportamento estrutural. Estes sistemas incluem, tipicamente, interfaces gráficas que apresentam a evolução temporal dos principais indicadores, bem como relatórios automáticos que sintetizam a informação relevante para períodos definidos.

Adicionalmente, a integração dos dados de monitorização com modelos numéricos de comportamento estrutural permite uma interpretação mais aprofundada dos

resultados e a simulação de cenários de carregamento, contribuindo para uma avaliação mais robusta da segurança.

A informação gerada pelos sistemas de monitorização dinâmica pode ser utilizada em diferentes contextos, incluindo a avaliação da resposta da barragem após eventos sísmicos, o acompanhamento da evolução do comportamento estrutural ao longo do tempo e o planeamento de inspeções e intervenções.

A forma como a informação é apresentada assume particular importância, devendo ser orientada para facilitar a interpretação por parte dos responsáveis pela exploração e pela segurança da barragem.

2.8 Apoio à decisão e integração na gestão da segurança

A utilidade dos sistemas de monitorização dinâmica de barragens de betão materializa-se, em última instância, na sua capacidade de apoiar a tomada de decisão no âmbito da gestão da segurança estrutural. Neste contexto, a informação produzida ao longo da cadeia de processamento — desde os parâmetros dinâmicos até aos indicadores de anomalia — deve ser integrada em processos que permitam uma interpretação eficaz e uma atuação adequada por parte das entidades responsáveis pela exploração da barragem.

A automatização desempenha aqui um papel determinante, ao permitir a disponibilização contínua de indicadores atualizados do comportamento estrutural, bem como a identificação imediata de desvios face ao comportamento de referência. Esta capacidade é particularmente relevante em situações que exigem uma resposta rápida, como na sequência de eventos sísmicos, em que a avaliação da integridade estrutural deve ser realizada num curto intervalo de tempo.

A integração dos sistemas de monitorização dinâmica com plataformas de gestão da segurança permite estabelecer níveis diferenciados de análise e decisão. Num primeiro nível, os sistemas fornecem informação de carácter operacional, associada ao acompanhamento regular do comportamento da barragem, incluindo a evolução dos parâmetros dinâmicos e a verificação da sua consistência com os modelos de referência. Num segundo nível, a deteção de desvios significativos pode desencadear procedimentos de análise mais detalhada, envolvendo a revisão de dados, a realização de inspeções complementares ou a atualização de modelos numéricos.

Adicionalmente, a articulação entre os dados de monitorização e os modelos numéricos permite uma interpretação mais robusta dos resultados, contribuindo para a redução das incertezas associadas à avaliação da segurança. Esta integração possibilita, por exemplo, a comparação entre a resposta observada e a resposta prevista para determinados cenários de carregamento, incluindo ações sísmicas, reforçando a capacidade de diagnóstico do sistema.

A informação produzida pode ainda ser utilizada no planeamento de ações de manutenção e na definição de estratégias de intervenção, permitindo uma abordagem mais proativa à gestão da segurança. Neste sentido, os sistemas de monitorização dinâmica contribuem para a evolução de modelos de gestão baseados em condição (condition-based maintenance), nos quais as decisões são suportadas por indicadores objetivos do estado da estrutura.

Deste modo, a integração dos sistemas de monitorização dinâmica nos processos de gestão da segurança representa um avanço significativo face às abordagens tradicionais, permitindo uma avaliação mais contínua, objetiva e fundamentada do comportamento estrutural das barragens de betão.

2.9 Considerações finais

A operacionalidade dos sistemas de monitorização dinâmica de barragens de betão assenta numa cadeia integrada de processos que, de forma contínua e automatizada, permite transformar sinais medidos em indicadores quantitativos do comportamento estrutural. Esta cadeia, que engloba a aquisição, o processamento, a identificação de parâmetros dinâmicos, a modelação de efeitos ambientais e a deteção de anomalias, constitui a base para uma avaliação sistemática e sustentada da segurança das estruturas.

A automatização desempenha um papel central em todas as etapas deste processo, assegurando não apenas a eficiência na gestão de grandes volumes de dados, mas também a consistência dos procedimentos e a objetividade dos resultados. Ao reduzir a dependência de intervenções manuais, estes sistemas permitem a implementação de metodologias de análise contínua, capazes de acompanhar a evolução do comportamento estrutural ao longo do tempo com um nível de detalhe anteriormente difícil de alcançar.

A identificação modal operacional emerge como um elemento-chave desta abordagem, ao possibilitar a extração de parâmetros dinâmicos diretamente relacionados com as propriedades mecânicas da estrutura. No entanto, a interpretação destes parâmetros exige a consideração rigorosa da influência de fatores ambientais, cuja modelação é indispensável para a definição de um comportamento de referência fiável. A capacidade de separar, de forma robusta, os efeitos ambientais das alterações estruturais constitui um dos aspetos mais críticos para a eficácia dos sistemas de monitorização.

Neste enquadramento, a deteção automática de anomalias assume particular relevância, permitindo identificar desvios face ao comportamento esperado e desencadear processos de análise mais aprofundada. A fiabilidade destes mecanismos depende da qualidade dos modelos de referência e da adequação dos critérios de decisão utilizados, sendo essencial garantir um equilíbrio entre sensibilidade à deteção de alterações e robustez face à variabilidade natural dos dados.

A integração da informação produzida nos processos de gestão da segurança representa o culminar desta cadeia operacional. A disponibilização de indicadores atualizados, a capacidade de resposta rápida a eventos e a articulação com modelos numéricos contribuem para uma abordagem mais informada e proativa na avaliação da segurança estrutural. Neste sentido, os sistemas de monitorização dinâmica não devem ser encarados apenas como ferramentas de observação, mas como componentes ativas dos sistemas de apoio à decisão.

Em síntese, a evolução dos sistemas de monitorização dinâmica, marcada pela crescente automatização e pela integração de metodologias avançadas de análise de

dados, tem vindo a transformar profundamente as práticas de controlo de segurança de barragens de betão. Esta evolução permite uma avaliação mais contínua, objetiva e fundamentada do comportamento estrutural, constituindo um elemento essencial na gestão moderna da segurança destas infraestruturas.

3 SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO DINÂMICA DE BARRAGENS DE BETÃO

3.1 Considerações iniciais

A monitorização do comportamento dinâmico de barragens de betão ao longo do tempo insere-se nas atividades de controle de segurança destas obras. A metodologia implementada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), inicia-se numa primeira fase, pela determinação dos parâmetros modais das obras, preferencialmente no final da construção ou para uma determinada fase de exploração, configurando esta a situação de referência, e posteriormente avaliar a sua evolução ao longo do tempo, verificando qualquer alteração que possa indiciar danos na barragem. A situação de referência é obtida, no final da construção, através da realização de dois ensaios de vibração forçada para duas situações distintas, uma primeira com albufeira vazia e a segunda quando é atingido o nível de pleno armazenamento, após o primeiro enchimento da albufeira [8].

A monitorização dinâmica de barragens de betão tem como objetivo a caracterização da resposta estrutural a ações variáveis no tempo, incluindo ações sísmicas e excitações ambientais. Ao contrário da monitorização convencional, baseada em grandezas quasi-estáticas, a monitorização dinâmica permite avaliar diretamente propriedades associadas ao comportamento dinâmico da estrutura, as quais são particularmente sensíveis a alterações das suas características mecânicas.

Neste contexto, a evolução dos sistemas de instrumentação e aquisição de dados tem permitido o desenvolvimento de soluções com elevado grau de automatização, capazes de assegurar não apenas a recolha contínua de dados, mas também o seu processamento e interpretação em tempo quase real. Esta evolução enquadra-se no conceito de *Structural Health Monitoring* (SHM), no qual a avaliação da segurança estrutural é suportada por indicadores derivados da resposta dinâmica.

Os sistemas de monitorização dinâmica de barragens de betão podem ser genericamente organizados em duas categorias principais:

- Sistemas de Monitorização Dinâmica Contínua (SMDC)
- Sistemas de Observação Sísmica (SOS)

Embora distintos nos seus objetivos e modos de operação, estes sistemas são complementares e, em muitos casos, implementados de forma integrada. O presente capítulo tem como objetivo descrever as arquiteturas funcionais destes sistemas, analisando os seus principais componentes, o fluxo de informação e os mecanismos de processamento e decisão associados. É dada particular atenção ao papel da automatização, que constitui um elemento central no funcionamento destes sistemas e na sua integração nos processos de gestão da segurança de barragens. Descreve-se também resumidamente as configurações dos sistemas de monitorização

dinâmicos implementados recentemente, apresentando-se a implementação efetuada no Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor.

3.2 Sistemas de monitorização dinâmica em continuo (SMDC)

3.2.1 Arquitetura geral do sistema

O objetivo dos sistemas de monitorização em contínuo do comportamento dinâmico de barragens consiste na medição de vibrações em vários pontos no corpo da barragem, em estruturas auxiliares e eventualmente ao nível da inserção, para diferentes tipos de excitação. A partir das acelerações medidas sob excitação ambiente/operacional/excecional é possível identificar automaticamente os parâmetros modais do sistema barragem-fundação-albufeira (frequências naturais, configurações modais e amortecimentos modais), ao longo da vida da obra.

A arquitetura deste sistema integra duas componentes fundamentais: uma fase inicial de aprendizagem, destinada à caracterização do comportamento de referência da estrutura, e uma fase de operação contínua, na qual os dados são adquiridos e analisados automaticamente (Figura 2).

Numa primeira fase, correspondente à fase de aprendizagem, procede-se à identificação inicial das propriedades dinâmicas da estrutura, incluindo frequências naturais, formas modais e coeficientes de amortecimento, tendo por base os resultados dos ensaios de vibração forçada realizados. Paralelamente, é realizada a modelação da influência de variáveis ambientais, como a temperatura e o nível da albufeira, permitindo estabelecer relações entre estas variáveis e os parâmetros dinâmicos. Com base nesta informação, é definido um comportamento de referência da barragem, que constitui o elemento central para a avaliação futura do seu desempenho.

Na fase de operação contínua, o sistema realiza a aquisição sistemática de dados de aceleração, tipicamente em intervalos regulares. Os sinais são automaticamente sujeitos a operações de pré-processamento, incluindo filtragem e verificação de qualidade, sendo posteriormente utilizados na identificação modal automática. Os parâmetros dinâmicos estimados são então corrigidos em função das condições ambientais, permitindo obter indicadores representativos do estado estrutural da barragem.

Os parâmetros assim obtidos são comparados com o comportamento de referência previamente definido, sendo avaliados os desvios existentes. Esta comparação constitui a base do processo de decisão automática, no qual se distingue entre situações de comportamento normal e casos em que são detetados desvios significativos.

Quando os parâmetros se mantêm dentro dos limites esperados, os resultados são armazenados e utilizados para o acompanhamento da evolução do comportamento estrutural ao longo do tempo. Por outro lado, quando são identificados desvios relevantes, o sistema desencadeia uma fase adicional de verificação e apoio à decisão, que inclui a confirmação da consistência dos resultados, a comparação com modelos numéricos e a avaliação da segurança estrutural com base em critérios previamente estabelecidos.

Finalmente, o sistema gera diferentes tipos de saídas, incluindo alertas, relatórios automáticos e informação para visualização em tempo real, sendo toda a informação armazenada em bases de dados que suportam a análise histórica e a melhoria contínua dos modelos de avaliação.



Figura 2 – Arquitetura do processamento automático dos registos dos sistemas de monitorização dinâmica em continuo implementados nas barragens portuguesas

3.2.2 Exemplo de aplicação

Devido à elevada rigidez das barragens, a resposta da estrutura às ações ambientais é reduzida, pelo que se opta por instalar acelerómetros uniaxiais na direção radial (direção de maior amplitude de movimento). A distribuição dos sensores pela estrutura deverá ser efetuada de modo que permita avaliar as configurações modais e sejam colocados em locais com maior amplitude para aumentar a fiabilidade das medições. É por isso comum serem instalados exclusivamente sensores nas galerias superiores uma vez que a resposta da estrutura é maior que as observadas em cotas inferiores, onde o ruído da aparelhagem é da mesma ordem de grandeza da respostas.

O sistema está normalmente configurado para efetuar registos de séries temporais de acelerações com a duração de 30 a 60 minutos em todos os pontos instrumentados. A duração é definida de acordo com as amplitudes dos sinais registados e com as técnicas usadas no seu tratamento, podendo ser ajustada se for conveniente. Para cada registo é efetuado o processamento automático para a determinação dos parâmetros modais, sendo assim possível obter no máximo 48/24 valores diários para cada parâmetro (correspondentes à consideração de registos de 30 ou 60 minutos). O sistema central constituído por um computador é responsável pela gestão e armazenamento dos registos. O tratamento automático dos registos poderá ser efetuado na unidade central do sistema ou num computador remoto que recebe os

dados e procede ao seu processamento. Esta divisão de tarefas poderá ser benéfica para a fiabilidade e duração do sistema.

Nestes sistemas são utilizados métodos de identificação modal "*output-only*" devido ao desconhecimento da excitação imposta à estrutura. Entre os métodos mais utilizados, encontram-se *Frequency-Domain Decomposition* (FDD), *Enhanced Frequency-Domain Decomposition* (EFDD), *Covariance driven Stochastic Subspace Identification* (SSI–Cov) e *poly-Least Squares Complex Frequency Domain* (p-LSCF). Nesta área o LNEC tem trabalhado em parceria com o ViBest da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) no desenvolvimento de metodologias para identificação modal automática aplicadas a barragens de betão [9][10][11]. Nesta linha de investigação estão a ser desenvolvidas e testadas metodologias para a deteção automática de alterações do comportamento estrutural e identificação da zona e dano inerente à referida modificação.

Como exemplo deste tipo de sistemas apresenta-se a descrição do que foi implemento na barragem do Baixo Sabor. O sistema de monitorização dinâmica em contínuo implementado na barragem é constituído por três subsistemas ligados por fibra ótica, perfazendo um total de 20 acelerómetros uniaxiais instalados na direção radial (Figura 3). Cada subsistema possui um digitalizador que posteriormente envia a informação para computador compacto Intel® NUC (*Next Unit of Computing*). Para realizar a análise modal deve-se garantir uma boa sincronização dos dados registados por todos os digitalizadores, o que exigiu a instalação de uma antena GPS (*Global Positioning System*) em cada subsistema. Além disso, o computador NUC é ligado à rede de fibra óptica entre a barragem e a central permitindo o seu acesso remoto. Apresenta-se na Figura 4, um esquema com os principais elementos que compõem o sistema de monitorização dinâmica em contínuo. Todos os registos temporais são transmitidos automaticamente através de uma ligação VPN (*Virtual Private Network*) dedicada, para as instalações do LNEC e da FEUP, onde posteriormente são processados e analisados.

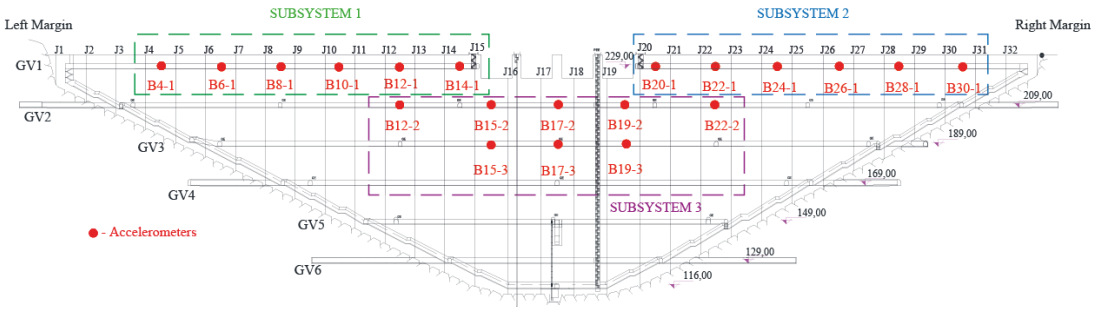


Figura 3 – Localização dos pontos de observação do sistema de monitorização dinâmica em contínuo instalado na barragem do Baixo Sabor .

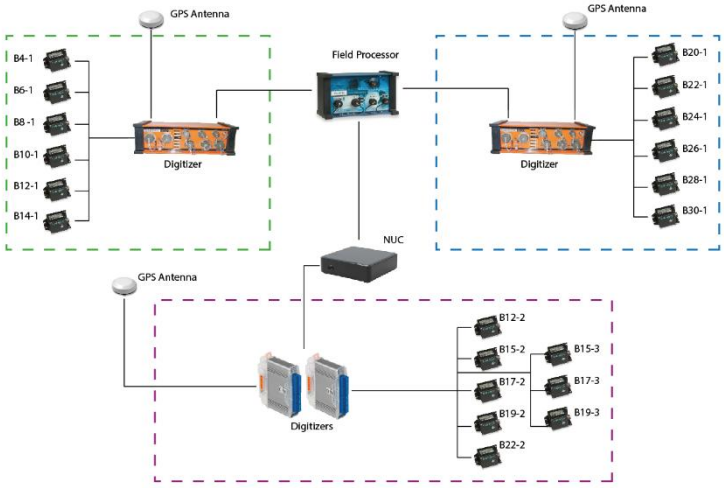


Figura 4 – Esquema geral da arquitetura do sistema de monitorização dinâmica em contínuo da barragem do Baixo Sabor

3.3 Sistemas de observação sísmica (SOS)

3.3.1 Arquitetura geral do sistema

De acordo com o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB)[12] é necessário instalar um Sistema de Observação Sísmica (SOS) que permita monitorizar a resposta dinâmica da estrutura durante a ocorrência de eventos sísmicos. Neste âmbito, tem sido instalado este tipo de sistemas nas barragens recentemente construídas. Os SOS, têm como objetivo possibilitar a análise do comportamento dinâmico das barragens quando sujeitas a ações sísmicas. Para esse efeito são utilizados sistemas permanentemente funcionais, que garantam a medição e o registo da resposta estrutural durante a ocorrência de sismos bem como a correta caracterização da ação dinâmica aplicada à barragem e, nas situações em que tal se considere útil, a propagação no terreno ao longo da albufeira.

Face à importância da obra e da zona em que está implantada, foram definidos dois tipos de SOS:

- Com instalação apenas de sensores na barragem, de modo a observar o comportamento dinâmico da estrutura e a caracterizar a ação sísmica imposta pela fundação.
- Com instalação do indicado no ponto anterior e também de estações remotas instaladas ao longo da albufeira, para determinar as características do evento sísmico (localização, magnitude, momento, etc).

O funcionamento do SOS baseia-se numa cadeia sequencial de aquisição, processamento, análise e decisão, ativada automaticamente pela deteção de um evento sísmico (Figura 5). O processo é iniciado pela deteção automática de um evento sísmico, com base na ultrapassagem de um limiar de aceleração previamente definido, que ativa o registo sincronizado dos sinais em todas as estações instrumentadas.

Após a ocorrência do evento, os registos são automaticamente recolhidos e transmitidos para o sistema central, onde são sujeitos a processamento automático. Este processamento inclui a remoção de componentes indesejadas, a aplicação de

filtros e a verificação da qualidade dos dados, bem como a determinação de indicadores característicos do movimento sísmico, como a aceleração e velocidade de pico. Com base nestes dados, procede-se à avaliação da resposta estrutural da barragem, incluindo a estimativa de parâmetros dinâmicos e a análise de indicadores de resposta.

Os resultados obtidos são então comparados com limiares previamente definidos, permitindo classificar automaticamente o evento em diferentes níveis de severidade. Esta classificação constitui o principal mecanismo de decisão do sistema, determinando o tipo de ações a implementar. Em situações em que os valores registados se mantêm dentro dos limites esperados, o comportamento é considerado normal, sendo os resultados apenas armazenados para efeitos de acompanhamento e análise futura.

Por outro lado, quando os limiares são ultrapassados, o sistema desencadeia automaticamente a emissão de alertas e ativa uma sequência de verificação da segurança da barragem. Esta sequência inclui a validação detalhada dos registos, a análise de possíveis indicadores de dano e a identificação das zonas potencialmente mais solicitadas da estrutura. Adicionalmente, é realizada a comparação entre a resposta observada e a resposta prevista por modelos numéricos, permitindo avaliar a coerência do comportamento estrutural e apoiar a interpretação dos resultados.

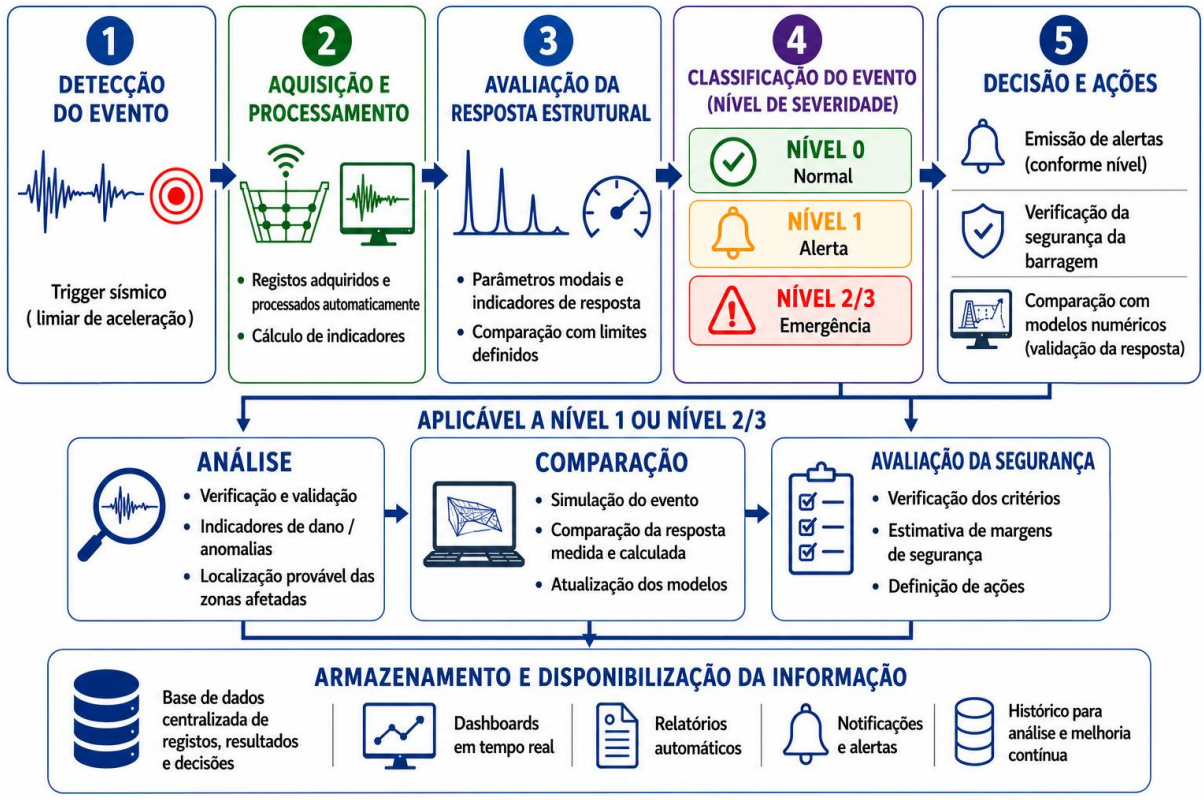


Figura 5 – Arquitetura do processamento automático dos registos dos sistemas de observação sísmica implementados nas barragens portuguesas

Com base nesta análise integrada, procede-se à avaliação do desempenho da barragem face aos critérios de segurança estabelecidos, podendo ser definidas recomendações para ações adicionais, como inspeções, intensificação da monitorização ou outras medidas de gestão. Todo o processo culmina com o

armazenamento estruturado da informação gerada, incluindo registos sísmicos, indicadores de resposta e resultados das análises, que ficam disponíveis para consulta, análise histórica e melhoria contínua dos modelos de avaliação da segurança.

3.3.2 Exemplo de aplicação

Como exemplo deste tipo de sistemas apresenta-se a descrição do que foi implemento no Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor (AHBS) que inclui as barragens do Baixo Sabor e do Feiticeiro. No AHBS foi instalado um sistema de monitorização estrutural que possibilita a medição e o registo da resposta das estruturas durante a ocorrência de sismos, e que permite também efetuar a caracterização das ações e o modo como se propagam no maciço rochoso, o qual é composto por três subsistemas com a seguinte composição genérica:

- Subsistema exterior: 6 estações remotas, implantadas diretamente no maciço rochoso, ao longo da área de intervenção do aproveitamento (Figura 6).
- Subsistema de montante: 6 estações interiores, instaladas na barragem do Baixo Sabor (Figura 7).
- Subsistema de jusante: 2 estações interiores, na barragem do Feiticeiro (Figura 8).

Cada ponto de monitorização é composto por uma acelerómetro tri-axial, com digitalização e registo local para posterior envio para o sistema central. Para além da gestão de toda a rede de estações, a unidade central foi dotada de meios para a deteção da origem dos eventos nas situações em que tal seja possível. Os registos provenientes do SOS são armazenados no computador inserido na unidade central, sendo fundamental as aplicações de gestão e exploração remota do sistema, tratamento automático dos registos relativos à resposta estrutural e ligação à base de dados da monitorização de barragens (gestBarragens).

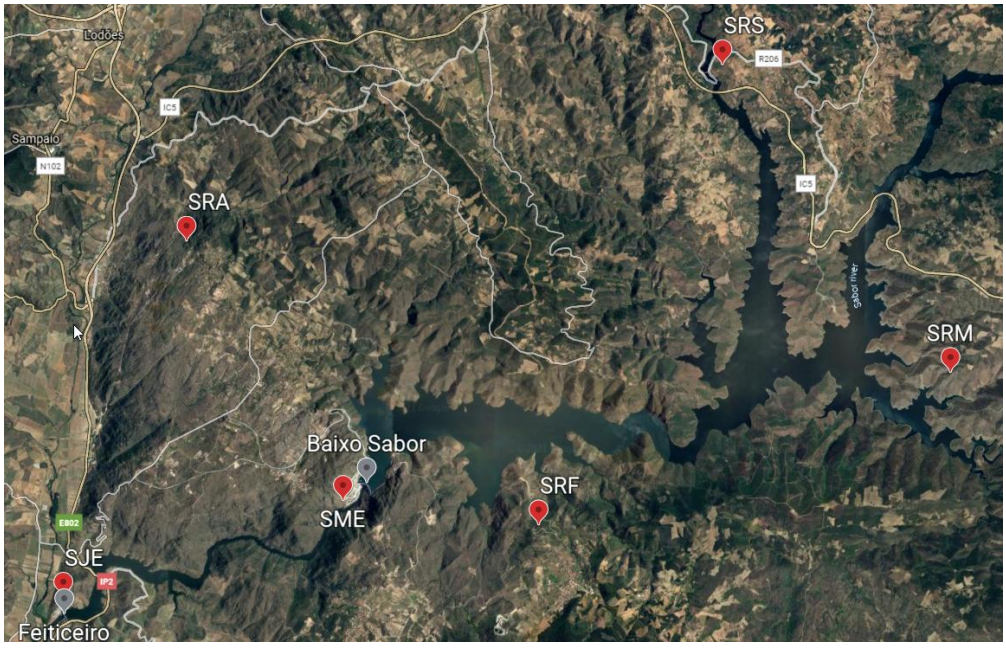


Figura 6 – Planta geral com a localização das estações sísmicas exteriores e dos subsistemas interiores do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor

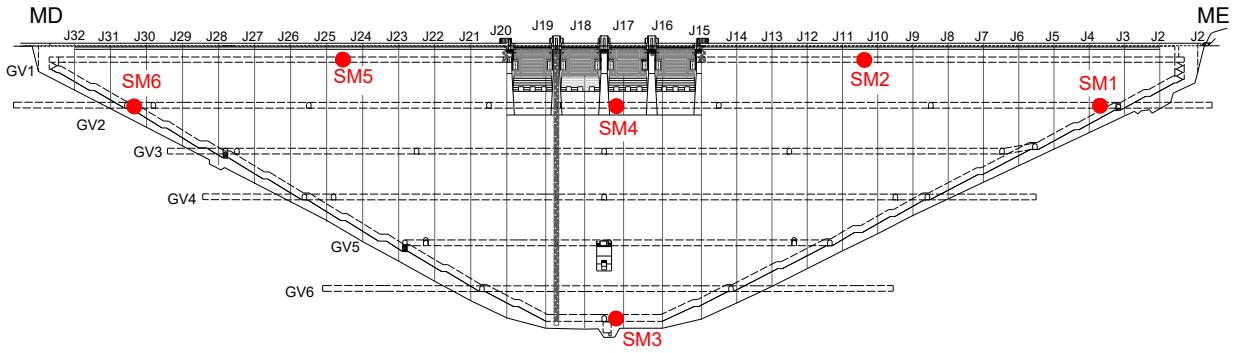


Figura 7 – Localização dos sismómetros do subsistema de montante na barragem do Baixo Sabor

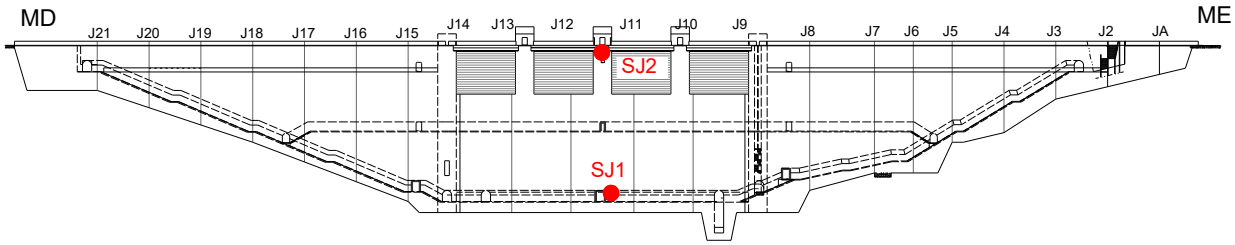


Figura 8 – Localização dos sismómetros do subsistema de jusante na barragem do Feiticeiro

Na Figura 9 apresenta-se um aspeto das estações remotas e instaladas no interior das barragens.



a) b)

Figura 9 – Vistas das estações sísmicas: a) remotas instaladas diretamente no maciço rochoso; e b) no interior das barragens

3.4 Considerações finais

A análise das arquiteturas e dos Sistemas de Monitorização Dinâmica Contínua (SMDC) dos Sistemas de Observação Sísmica (SOS) evidencia duas abordagens distintas e complementares na avaliação do comportamento dinâmico de barragens de betão. Os sistemas SOS são orientados para a resposta a eventos sísmicos, permitindo a caracterização rápida da ação e da resposta estrutural, enquanto os

sistemas SMDC asseguram uma monitorização contínua, baseada na identificação sistemática de parâmetros dinâmicos e na análise da sua evolução ao longo do tempo.

Ambos os sistemas integram cadeias automatizadas de aquisição, processamento e análise de dados, embora com diferentes modos de operação. Nos SOS, a automatização está associada à deteção de eventos e à avaliação imediata da sua severidade, enquanto nos SMDC suporta o tratamento contínuo de grandes volumes de dados e a deteção de desvios face a um comportamento de referência. A complementaridade entre estes sistemas constitui um aspeto central para a gestão da segurança, permitindo combinar a monitorização contínua do estado estrutural com a capacidade de resposta a ações excecionais. Neste contexto, a integração de SOS e SMDC contribui para uma avaliação mais robusta, sistemática e fundamentada da segurança de barragens de betão.

Neste contexto, o acompanhamento dinâmico do comportamento de barragens de betão, permite apoiar a avaliação da segurança das obras de uma forma expedita e global. A evolução recente destes sistemas tem sido marcada pela crescente automatização dos processos de aquisição, tratamento e análise de dados, permitindo a transformação de informação em indicadores relevantes para o controlo da segurança estrutural. Os sistemas de observação do comportamento dinâmico têm sido implementados em todas as novas barragens recentemente construídas. Na Tabela 1 apresentam-se os sistemas instalados em barragens portuguesas. O LNEC foi o responsável pela definição e configuração dos sistemas de observação dinâmica e atualmente faz a gestão e exploração destes sistemas.

Tabela 1 - Barragens em Portugal com sistema de observação sísmica (SOS) e sistemas de monitorização dinâmica em continuo (SMDC)

Barragem	Ano de construção	Tipo	Altura máxima (m)	Dono de obra	SOS		SMDC
					Tipo 1	Tipo 2	
Alqueva	2002	Abóbada	96,0	EDIA		X	-
Alto Ceira II	2014	Abóbada	41,0	EDP	X		-
Alto Tâmega	2023	Abóbada	106,5	Iberdrola	X		-
Baixo Sabor	2015	Abóbada	123,0	Engie		X	X
Cabril	1954	Abóbada	136,0	EDP	-	-	X
Daivões	2020	Arco-gravidade	77,5	Iberdrola	X		-
Feiticeiro	2015	Arco-gravidade	45,0	Engie		X	-
Foz Tua	2017	Abóbada	108,0	Engie		X	X
Ribeiradio	2015	Arco-gravidade	83,0	EDP	X		-

4 CONCLUSÕES

O presente artigo analisou os sistemas de monitorização automática do comportamento dinâmico de barragens de betão, com particular enfoque nos Sistemas de Monitorização Dinâmica Contínua (SMDC) e nos Sistemas de Observação Sísmica (SOS), destacando os seus objetivos, arquiteturas e operacionalidade.

A análise realizada evidencia que estes sistemas permitem uma caracterização abrangente e contínua do comportamento estrutural, suportada por processos automáticos de aquisição, processamento e análise de dados. Em particular, a extração de indicadores dinâmicos, como frequências naturais, formas modais e amortecimentos, constitui a base para a avaliação do estado estrutural das barragens.

A integração dos resultados obtidos pelos sistemas SOS e SMDC com modelos numéricos calibrados assume um papel central na definição de limiares de alarme e na interpretação do comportamento observado (Figura 10). Esta abordagem integrada permite combinar a informação experimental com o conhecimento do comportamento estrutural previsto, reforçando a fiabilidade dos processos de avaliação.



Figura 10 – Diagrama funcional para apoio à avaliação da segurança de barragens de betão, baseado na integração de sistemas automáticos de monitorização do comportamento dinâmico

A definição de limiares de decisão, baseada nesta integração, constitui um elemento-chave para a operacionalização dos sistemas de monitorização, permitindo a identificação de desvios relevantes e o desencadeamento automático de ações. Neste contexto, os sistemas de monitorização dinâmica deixam de desempenhar apenas uma função de observação, passando a integrar diretamente os processos de apoio à decisão.

A articulação entre monitorização contínua (SMDC), resposta a eventos sísmicos (SOS) e modelação numérica permite, assim, uma abordagem mais robusta e sistemática à avaliação da segurança estrutural, suportando tanto a deteção precoce de alterações como a análise de situações de carregamento extremo.

Perspetivando desenvolvimentos futuros, a evolução destes sistemas passará pela sua crescente integração com modelos digitais da estrutura (digital twins) e pela incorporação de técnicas de inteligência artificial, permitindo uma atualização contínua do estado da barragem e uma maior capacidade preditiva. Esta evolução contribuirá para consolidar uma abordagem baseada em dados, na qual a avaliação da segurança estrutural se torna um processo contínuo, automatizado e permanentemente suportado por informação atualizada.

5 AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Movhera/ENGIE a autorização concedida para a apresentação de alguns resultados relativos ao estudo e acompanhamento do comportamento dinâmico da barragem do Baixo Sabor. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação do LNEC "SSDAM - Avaliação da segurança sísmica de barragens de betão e alvenaria" (Ref.: 0402/1102/24146).

6 PALAVRAS-CHAVE

Monitorização da integridade estrutural (SHM), Automatização da monitorização estrutural, Comportamento dinâmico, Modelos numéricos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ICOLD, (2016) – "Bulletin 154 – Dam Monitoring Systems".

[2] Prakash, G.; Dugalam, R.; Barbosh, M.; Sadhu, A. (2022) – "Recent advancement of concrete dam health monitoring technology: A systematic literature review" Structures, Volume 44, (https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.021).

[3] Deng, Z.; Gao, Q.; Huang, M.; Wan, N.; Zhang, J.; He, Z. (2025) – "From data processing to behavior monitoring: A comprehensive overview of dam health monitoring technology", Structures, Volume 71, (https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108094).

[4] Klun, M.; Kryžanowski, A. (2022) – "Dynamic monitoring as a part of structural health monitoring of dams". Archives of Civil Engineering, Polish Academy Of Sciences (https://doi.org/10.24425/ace.2022.140186).

[5] Mata, J.; Salazar, F.; Barateiro, J.; Antunes, A. (2021) –"Validation of Machine Learning Models for Structural Dam Behaviour Interpretation and Prediction". Water, 2021. 13(19): p. 2717 (https://doi.org/10.3390/w13192717).

[6] Mata, J.; Gomes, J.P.; Pereira, S.; Magalhães, F.; Cunha, Á. (2023) – "Analysis and interpretation of observed dynamic behaviour of a large concrete dam aided by soft computing and machine learning techniques". Engineering Structures, 2023. 296: p. 116940 (https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116940).

[7] Pereira, S.; Magalhães, F.; Mata, J.; Gomes, J.P.; Cunha, A. (2025) – "Anomaly detection on a concrete arch dam: exploring the influence of training periods".

10th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN 2025, Rhodes, Grécia (https://doi.org/10.7712/120125.12598.25810).

[8] Gomes, J.P.; Lemos, J.V. (2020) – "Characterization of the dynamic behaviour of a concrete arch dam by means of forced vibration tests and numerical models", Earthquake Engineering & Structural Dynamics. Volume 49, Issue 7, pág. 679-694, junho. (https://doi.org/10.1002/eqe.3259).

[9] Pereira, S.; Magalhães, F.; Gomes, J.P.; Cunha, A.; Lemos, J.V. (2018) – "Dynamic monitoring of a concrete arch dam during the first filling of the reservoir". Engineering Structures, Volume 174, pag. 548-560, (https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.076).

[10] Pereira, S., Magalhães, F., Gomes, J.P., Cunha, Á., Paixão, J., Lemos, J.V. (2020) – "Continuous Dynamic Monitoring System of Foz Tua Arch Dam: Installation and First Results". European Workshop on Structural Health Monitoring. EWSHM 2020. vol 127, (https://doi.org/10.1007/978-3-030-6459-46_32).

[11] Pereira, S.; Gomes, J.P.; Magalhães, F.; Cunha, A.; Lemos, J. V. (2023) – "Seven years of continuous dynamic monitoring of baixo sabor dam". 9th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN 2023, Atenas, Grécia (https://doi.org/10.7712/120123.10669.20790).

[12] RSB, (2018). Regulamento de Segurança de Barragens. Decreto Lei n.º 21/2018.



Jorge Pereira GOMES

Bacharelato em engenharia civil (ISEL, 1987), licenciatura em engenharia civil (IST, 1990), mestrado em engenharia civil (IST, 1996), doutoramento em ciências de engenharia civil (UFRJ, 2006), grau de especialista em barragens (LNEC, 2006). Atualmente é investigador principal no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e professor adjunto convidado no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL)

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
VI SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS
TEMA IN.1, IN.2, IN.3, IN.4 (IN.4)
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

SMART DAMS E INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA: REVISÃO CONCEITUAL E DESAFIOS PARA A ENGENHARIA BRASILEIRA

Wellerson BASTOS
Engenheiro Civil - Pimenta de Ávila Consultoria

Marcos Filho PIMENTA
Engenheiro Civil - Pimenta de Ávila Consultoria

Marcos PIMENTA
Engenheiro Civil - APEL - Ávila Pimenta Engenharia

Manuela TAVARES
Graduanda em Engenheira Civil - Pimenta de Ávila Consultoria

Marina MARTINS
Engenheira Civil - Pimenta de Ávila Consultoria

Palavras-chave: Smart dams; instrumentação geotécnica; IoT; gêmeo digital; monitoramento de barragens.

RESUMO

O presente artigo explora o conceito de *Smart Dams*, ou barragens inteligentes como evolução dos sistemas tradicionais de monitoramento e gestão da segurança de barragens, ao integrar a infraestrutura física a tecnologias digitais avançadas, tais como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, computação em nuvem, gêmeos digitais e conceitos BIM. Nesse contexto, a instrumentação geotécnica assume papel estruturante, configurando-se como o principal elemento sensorial das barragens inteligentes ao viabilizar a percepção do comportamento estrutural, hidráulico e geotécnico, a análise dinâmica e o suporte à tomada de decisão. O trabalho apresenta uma revisão conceitual do paradigma *Smart Dams*, com ênfase no papel do monitoramento na construção de sistemas com capacidades de autopercepção, autodiagnóstico e apoio à decisão. A partir de referências nacionais e internacionais, discutem-se a evolução dos sistemas de instrumentação, arquiteturas baseadas em IoT, gêmeos digitais, valores de controle e *Trigger Action Response Plans* (TARPs). Analisa-se, ainda, o estágio atual da engenharia brasileira frente a esse paradigma. Conclui-se que a instrumentação geotécnica é essencial à transição para barragens inteligentes; entretanto, sua automatização isolada não caracteriza uma *Smart Dam*, sendo necessária sua integração a inspeções, validação metrológica, modelos de comportamento, TARPs e processos estruturados de alerta e decisão.

ABSTRACT

This paper explores the concept of Smart Dams as an evolution of traditional dam monitoring and safety management systems, integrating physical infrastructure with advanced digital technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, cloud computing, digital twins and BIM concepts. In this context, geotechnical instrumentation plays a structural role as the main sensory element of intelligent dams, enabling perception of structural, hydraulic and geotechnical behaviour, dynamic analysis and decision-making support. The paper presents a conceptual review of the Smart Dams paradigm, emphasizing the role of monitoring in the development of systems with self-perception, self-diagnosis and decision-support capabilities. Based on national and international references, the evolution of instrumentation systems, IoT-based architectures, digital twins, control thresholds and Trigger Action Response Plans (TARPs) are discussed. The current stage of Brazilian engineering in relation to this paradigm is also critically assessed. It is concluded that geotechnical instrumentation is essential for the transition toward intelligent dams; however, its automation alone does not characterize a Smart Dam. Effective implementation requires integration with inspections, metrological validation, behavioural models, TARPs and structured decision-making processes.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A segurança de barragens tem evoluído de programas tradicionais de leitura de instrumentos e inspeções visuais periódicas para sistemas integrados de monitoramento, inspeção, diagnóstico e suporte à decisão. Neste artigo, o termo monitoramento é utilizado em sentido amplo, equivalente prático ao conceito de *Surveillance* do ICOLD, abrangendo instrumentação, inspeções visuais, verificações, testes, documentação, gestão de dados e avaliação global da segurança [1].

A Figura 1 sintetiza esse entendimento: dados da instrumentação, realização de inspeções visuais e verificações devem convergir para análises preliminares e para a avaliação global da segurança. O conceito de *Smart Dam* não substitui essa lógica; ela adiciona camadas de integração, validação, modelagem e suporte à decisão, por meio da aplicação de tecnologias avançadas, buscando reduzir o intervalo entre observação, interpretação e resposta.

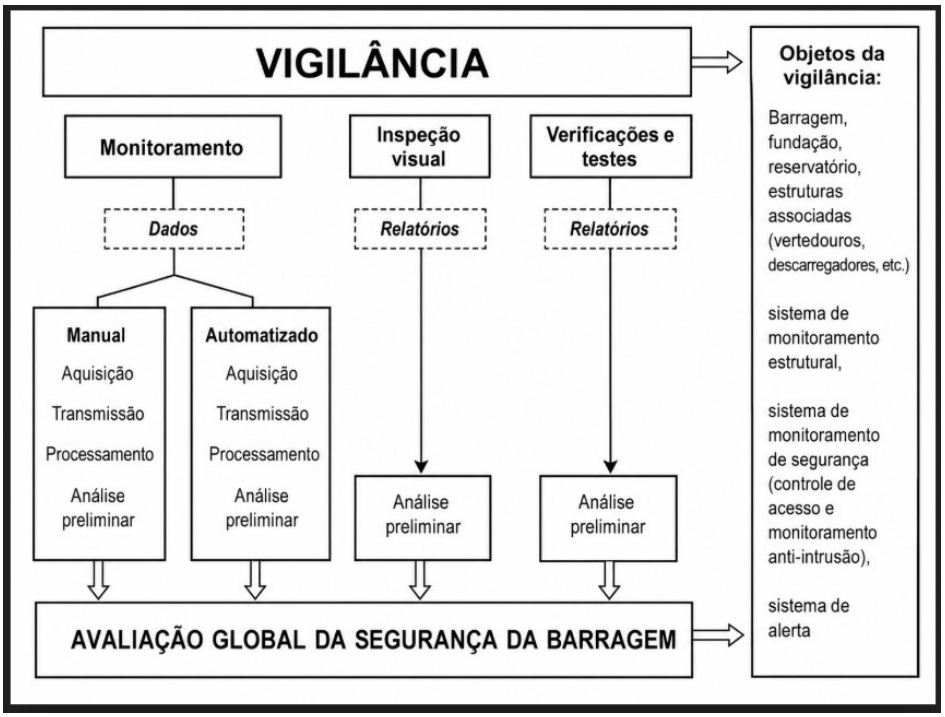


Figura 1 - Componentes primários de um programa de vigilância/monitoramento de barragens e estruturas associadas.

Fonte: adaptado de [1].

A literatura recente associa *Smart Dams* à integração entre infraestrutura física e tecnologias digitais como IoT, computação em nuvem, big data, inteligência artificial e gêmeos digitais [2, 3]. A Figura 2 representa a inserção conceitual dessa camada inteligente no fluxo de vigilância: a estrutura básica permanece baseada em monitoramento, inspeção e testes, mas os dados passam a alimentar sistemas integrados de análise, plataformas digitais, que armazenam os valores de controle, modelos, logicas e sistemas de análise para detecção de anomalias e suporte à decisão.

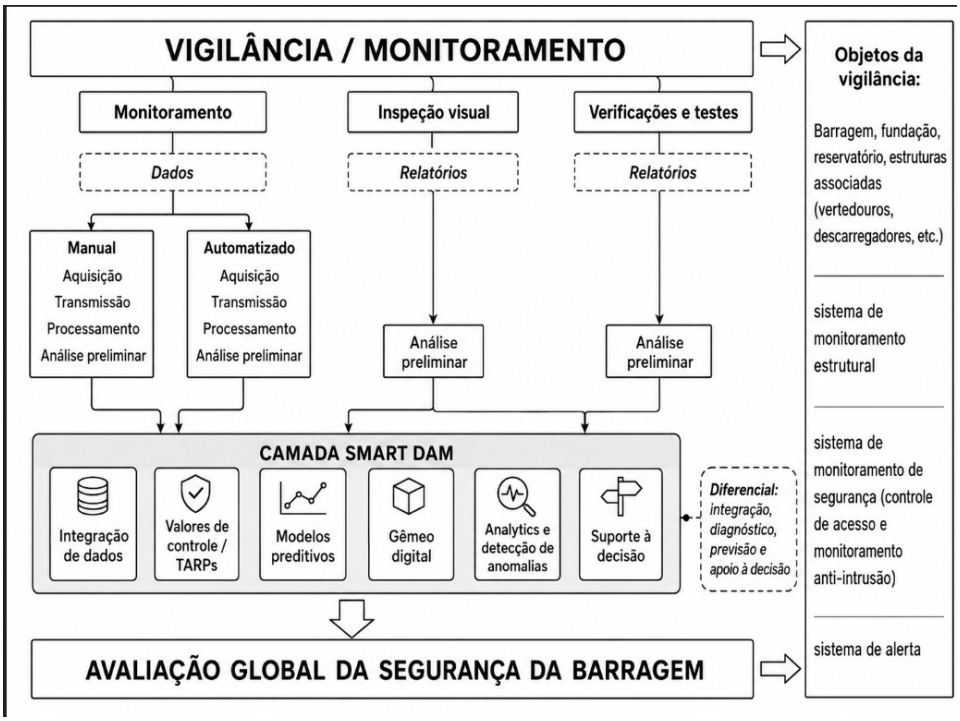


Figura 2 – Inserção da camada *Smart Dam* no fluxo de vigilância/monitoramento de barragens.

Fonte: elaborado pelos autores, adaptado conceitualmente de ICOLD [1] e Zhong et al. [3].

A partir dessa base conceitual, o artigo segue uma linha de raciocínio progressiva. Inicialmente, discutem-se os fundamentos de monitoramento, instrumentação e inspeção de barragens. Em seguida, são abordados valores de controle, limites de desempenho e *TARPs* como elementos de ligação entre dado e ação. Na sequência, apresenta-se o paradigma *Smart Dams*, com ênfase na integração entre sensoriamento, *IoT*, *analytics*, modelos preditivos e gêmeos digitais. Posteriormente, discute-se o monitoramento orientado por modos potenciais de falha, no qual a análise de risco aparece como ferramenta de organização do programa de monitoramento. Por fim, avaliam-se o panorama brasileiro, os desafios de implementação, uma proposta de matriz de maturidade e as conclusões.

1.2 Objetivo

Este artigo tem como objetivo revisar o paradigma *Smart Dams* com foco no papel estruturante da instrumentação geotécnica, das inspeções visuais, dos valores de controle, das TARPs e do monitoramento orientado por modos potenciais de falha. Busca-se demonstrar que a transição para barragens inteligentes exige integração entre percepção, validação, análise, diagnóstico, previsão e suporte à decisão

1.3 Metodologia e escopo

O trabalho foi desenvolvido como revisão técnico-conceitual baseada em literatura nacional e internacional sobre vigilância de barragens, instrumentação geotécnica, automatização, valores de controle, *TARPs*, gêmeos digitais, IoT, BIM, analytics e gestão de dados. Não se trata de estudo de caso único, mas de uma proposta de organização conceitual para apoiar a evolução da engenharia brasileira rumo a sistemas de monitoramento mais integrados e rastreáveis

2. MONITORAMENTO, INSTRUMENTAÇÃO E INSPEÇÃO DE BARRAGENS

2.1 Conceito de monitoramento de barragens

Monitoramento de barragens, entendido neste artigo como equivalente prático ao conceito de “Surveillance”, conforme descrito no item 1, é o conjunto de atividades destinadas a observar, medir, registrar, validar e interpretar o comportamento da estrutura, da fundação, do reservatório e de seus sistemas associados. Em sentido restrito, o termo costuma ser associado à leitura de instrumentos; em sentido amplo, conforme a ICOLD, inclui inspeções, verificações, testes, gestão documental e avaliação global da segurança [1].

Essa distinção é relevante porque séries instrumentais isoladas não explicam o comportamento da barragem. Leituras de poropressão, vazão ou deslocamento só adquirem significado quando analisadas em conjunto com o nível do reservatório, chuvas, condições operacionais, inspeções visuais, histórico da estrutura e hipóteses de comportamento.

2.2 Instrumentação geotécnica como sistema sensorial

A instrumentação geotécnica constitui a principal camada sensorial da barragem. Ela transforma grandezas físicas associadas ao comportamento hidráulico, geotécnico e estrutural em dados mensuráveis. Conforme Dunnicliff [5] e Silveira [6], a instrumentação não deve ser entendida apenas como instalação de equipamentos, mas como processo de engenharia que envolve definição de objetivos, seleção, instalação, leitura, validação, interpretação e decisão.

A seleção dos instrumentos deve partir de perguntas de engenharia: qual mecanismo (modo de falha) pode se desenvolver, onde ele pode ser observado, qual grandeza o representa, com que precisão deve ser medida e qual ação será tomada caso haja desvio. A Tabela 1 apresenta um exemplo de relação simples de grandezas comumente monitoradas em barragens, instrumentos usuais, soluções de transdutores que permitem a automatização e função técnica no monitoramento.

Tabela 1 – Relação preliminar simples entre grandezas monitoradas, instrumentos e possibilidades de automatização.

Grandeza monitorada	Instrumentos usuais	Transdutores/soluções de automatização	Função no monitoramento
Poropressão / subpressão	Piezômetro Casagrande, piezômetro de corda vibrante, piezômetro pneumático ou piezoresistivo	Transdutores de pressão de corda vibrante, sensores piezoresistivos 4-20 mA e transdutores de pressão por fibra óptica	Avaliar resposta hidráulica do maciço e fundação, estabilidade, drenagem e comportamento frente a carregamentos
Nível freático	Indicador/Medidor de nível d’água	Transdutores de pressão de corda vibrante, sensores piezoresistivos 4-20 mA e transdutores de pressão por fibra óptica	Controlar condição de saturação e eficiência dos sistemas de drenagem
Vazão de percolação	Vertedor triangular/trapezoidal, calha Parshall, drenos instrumentados	Sensor ultrassônico, transdutor de nível, weir monitor, câmera/visão computacional	Identificar variações de percolação, colmatação, concentração de fluxo e alterações de regime
Deslocamentos superficiais	Marcos topográficos, prismas, GNSS, radar, estação total	Estação total robotizada, GNSS, radar terrestre, InSAR	Acompanhar deformações, recalques, deslocamentos progressivos e

Grandeza monitorada	Instrumentos usuais	Transdutores/soluções de automatização	Função no monitoramento
			estabilidade global
Deslocamentos internos	Inclinômetros, extensômetros, pêndulos	Inclinômetros in-place, sensores MEMS Shape Array (SAA)	Caracterizar deformações internas e movimentos relativos entre zonas da estrutura e fundação
Vibração / sismicidade	Geofones, acelerômetros	Acelerômetros digitais, geofones conectados a dataloggers	Registrar gatilhos dinâmicos e avaliar resposta a eventos sísmicos, vibrações de obra ou tráfego
Temperatura / deformação distribuída	Termômetros, fibra óptica	Fibra óptica distribuída	Apoiar detecção de áreas de percolação anômala, fissuração, comportamento térmico e deformações distribuídas

Fonte: elaborado pelos autores, com base em Dunnicliff [5], Silveira [6] e USACE [7].

A Figura 4 representa a lógica tradicional da instrumentação de monitoramento de barragens, na qual os instrumentos instalados em campo são lidos manualmente, os dados são posteriormente transcritos para planilhas ou sistemas e a análise é realizada pelo engenheiro responsável. Esse arranjo ainda é amplamente utilizado e possui valor técnico relevante, sobretudo porque mantém a presença periódica de equipes em campo, favorece a identificação de anomalias visuais e permite a verificação direta das condições dos instrumentos. Entretanto, apresenta limitações relacionadas à periodicidade das leituras, à defasagem entre medição e análise, à possibilidade de erros de transcrição e à dificuldade de resposta rápida diante de variações abruptas de comportamento.

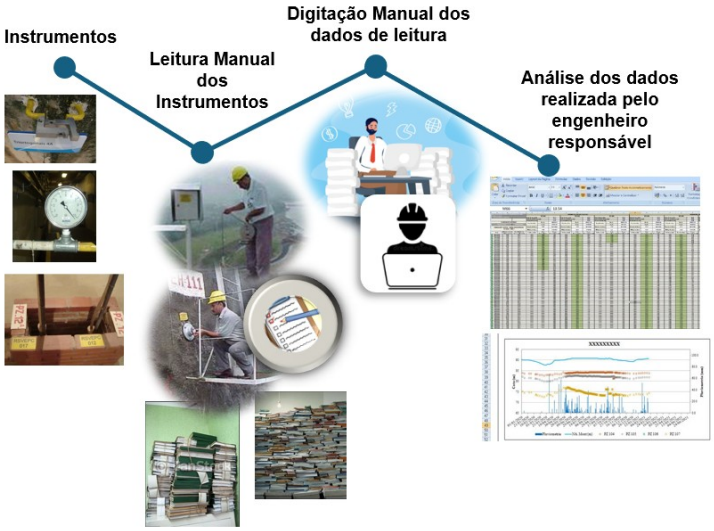


Figura 4 – Fluxo típico de monitoramento com instrumentação convencional, leitura manual, digitação de dados e análise técnica.

Fonte: elaborado pelos autores.

A Figura 5 ilustra a transição para sistemas automatizados, nos quais instrumentos elétricos ou transdutores são conectados a *dataloggers* ou unidades remotas de aquisição, com posterior transmissão dos dados para plataformas de visualização, armazenamento e processamento. Nessa configuração, instrumentos como piezômetros de corda vibrante, transdutores piezoresistivos, sensores de nível,

medidores automatizados de vazão, inclinômetros *in-place*, sensores *MEMS*, estações totais robotizadas, GNSS e fibras ópticas passam a compor uma rede de aquisição contínua de dados [4]. Ainda assim, é necessário distinguir o instrumento geotécnico, cuja função é medir uma grandeza relevante ao comportamento da barragem, do sistema de automatização, que viabiliza a aquisição, transmissão, armazenamento e visualização da leitura.



Figura 5 – Fluxo típico de automatização da instrumentação com transdutores, sistema de aquisição, transmissão automática e plataforma de gestão de dados.

Fonte: elaborado pelos autores.

Essa distinção é particularmente importante porque a automatização pode induzir uma falsa percepção de aumento automático da segurança. Na realidade, a confiabilidade do sistema passa a depender de novos elementos: calibração dos transdutores, estabilidade térmica, proteção contra umidade e descargas atmosféricas, integridade de cabos, alimentação elétrica, comunicação, redundância, proteção contra vandalismo e consistência entre leituras manuais e automáticas. Assim, a automatização deve ser tratada como uma ampliação da capacidade de observação, e não como substituição a interpretação da engenharia.

2.3 Inspeção visual e inspeção inteligente

A inspeção visual continua indispensável porque identifica manifestações qualitativas e contextuais que nem sempre são captadas por instrumentos, como surgências, erosões, trincas, abatimentos, vegetação anômala, obstruções de drenagem, danos em estruturas extravasoras e alterações nas condições de acesso. O *ICOLD* recomenda inspeções regulares, documentadas, apoiadas por checklists e integradas aos dados instrumentais [1].

No contexto das *Smart Dams*, a inspeção visual é ampliada por ferramentas de inspeção inteligente, como drones, câmeras fixas, robôs, capacetes inteligentes, imageamento térmico, visão computacional e registro georreferenciado de anomalias. A Figura 6 apresenta exemplos dessas tecnologias, que devem complementar, e não substituir, o julgamento técnico.



Figura 6 – Exemplos de tecnologias aplicáveis à inspeção visual e às inspeções inteligentes em barragens e usinas hidrelétricas.

Fonte: elaborado pelos autores, com base nos conceitos de inspeção inteligente [2].

2.4 Confiabilidade metrológica e validação dos dados

A confiabilidade metrológica é condição para qualquer *Smart Dam*. Dados automatizados somente agregam valor quando são rastreáveis, validados e tecnicamente interpretáveis. Em piezômetros de corda vibrante, por exemplo, a confiabilidade depende da verificação do sensor, saturação da pedra porosa, leitura inicial, compensação de temperatura, aplicação correta de equações de transformação das leituras em medidas calculadas e avaliação da qualidade do sinal elétrico do sensor periodicamente [8]. A Figura 7 ilustra, de forma esquemática, a influência da saturação da pedra porosa na condição de operação do sensor.

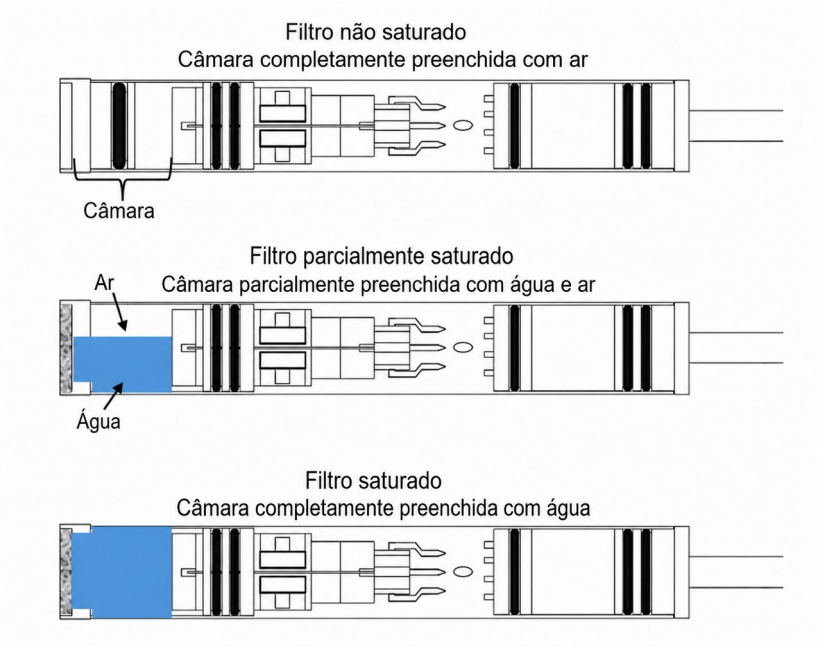


Figura 7 – Representação das condições de saturação da pedra porosa dos piezômetros de corda vibrante.

Fonte: adaptado de [8].

Também devem ser considerados ruídos, desvios e fuga de sinais, perda de comunicação, falha de energia, danos em cabos, vandalismo, interferência eletromagnética e manutenção preventiva. A comparação entre leituras manuais e automáticas é essencial nas fases de comissionamento e operação inicial. A Figura 8 ilustra uma possibilidade de verificação da qualidade do sinal, mostrando que o valor final apresentado pelo sistema deve ser acompanhado por diagnóstico do sinal que originou a leitura.[8]

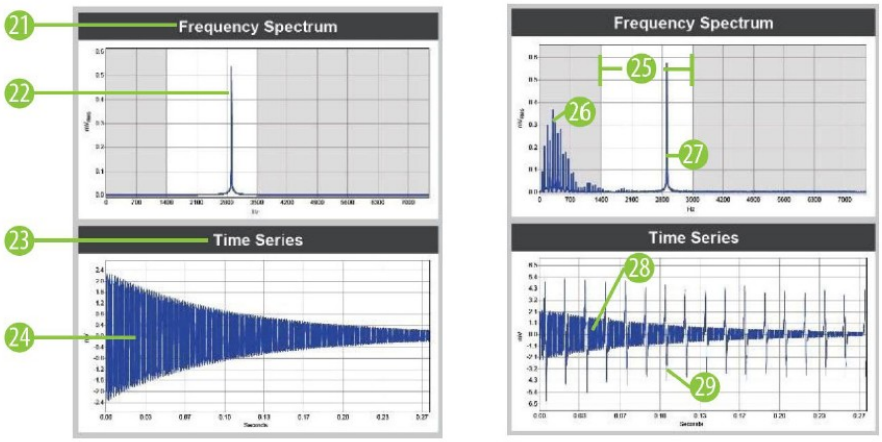


Figura 8 – Exemplo de verificação da qualidade do sinal em piezômetros de corda vibrante, com comparação entre sinal íntegro e sinal com interferência.

Fonte: adaptado de [8].

3. VALORES DE CONTROLE, DESEMPENHO E DIAGNÓSTICO

3.1 Função dos valores de controle

Valores de controle são a ponte entre as Medidas calculadas (variáveis de engenharia), diagnóstico rápido e possíveis ações de resposta de segurança. Eles estabelecem faixas de comportamento esperado e permitem reconhecer desvios, e mudanças de regime. Segundo Vasconcellos Filho seu objetivo é permitir o diagnóstico precoce de tendências que possam sugerir o desenvolvimento de um modo de falha.

Neste artigo, os valores de controle são tratados como uma das ferramentas de interpretação associado ao desempenho da estrutura, ao mecanismo físico monitorado e às respostas previstas em *TARPs*. Essa abordagem reduz alarmes genéricos e aumenta a utilidade técnica dos dados, especialmente em sistemas automatizados.

Os valores de controle têm a função de estabelecer faixas de comportamento esperado para parâmetros monitorados, de modo a sinalizar mudanças potencialmente relevantes à segurança. Segundo [9], seu objetivo é permitir o diagnóstico precoce de tendências adversas que possam sugerir o desenvolvimento de um modo de falha. Assim, mais do que indicar se uma leitura está “alta” ou “baixa”, os valores de controle ajudam a responder perguntas de engenharia: o desvio é compatível com a operação normal? Há mudança de tendência? O desvio está associado a carregamento sazonal, à condição hidráulica do reservatório ou a uma alteração anômala do comportamento?

Em barragens, essa interpretação não pode ser dissociada do mecanismo monitorado. Um aumento piezométrico, por exemplo, pode ter significados distintos conforme a seção instrumentada, a drenagem existente, a posição do reservatório, a condição dos filtros, a resposta de instrumentos vizinhos e as observações de campo. Por isso, o valor de controle deve ser entendido como parte de um processo de diagnóstico, e não como um simples limite administrativo.

Essa lógica é particularmente importante em sistemas automatizados e em *Smart Dams*. A elevada frequência de aquisição só produz valor quando os dados podem ser comparados, em tempo adequado, com critérios de interpretação tecnicamente consistentes. Como observam [9], somente o estabelecimento de faixas de controle e a automação da verificação imediata dos dados permitem o diagnóstico preliminar célere de anomalias.

3.2 Métodos determinísticos, estatísticos e modelos preditivos

Limites determinísticos são definidos a partir de modelos de projeto e análises de engenharia, como estabilidade, percolação, linha freática, poropressões, gradientes hidráulicos, subpressões, tensões, deformações e fatores de segurança. Outros mecanismos requerem parâmetros específicos, como vazão, turbidez, condição dos drenos, operação de vertedouros e evidências de inspeção visual.

Modelos estatísticos e preditivos utilizam séries históricas, regressão linear e múltipla, médias móveis, decomposição sazonal e correlação com nível do reservatório, temperatura, precipitação e tempo. Eles são úteis para estimar o comportamento esperado e gerar limites de desempenho a partir dos resíduos, mas devem ser validados e interpretados com base em engenharia e no histórico operacional [9]. A Tabela 2 sintetiza exemplos de parâmetros de controle associados a mecanismos monitoráveis.

Tabela 2 – Exemplos de parâmetros de controle associados a modos potenciais de falha.

Modo potencial de falha	Parâmetros de controle	Evidências complementares	Interpretação esperada
Instabilidade de talude	Poropressão, subpressão, nível freático, deslocamentos e deformações	Trincas, abatimentos, deformações superficiais	Avaliar perda de resistência, aumento de solicitação e necessidade de análise de estabilidade
Erosão interna	Vazão, turbidez, piezometria, gradiente hidráulico	Surgências, carreamento de material, umidade localizada	Identificar progressão de percolação concentrada e necessidade de inspeção/intervenção
Liquefação / gatilho dinâmico	Poropressões, acelerações, vibrações, deslocamentos	Trincas, recalques, perda de rigidez aparente	Relacionar carregamento dinâmico, suscetibilidade do material e resposta observada
Galgamento	Nível do reservatório, vazão afluente, capacidade vertente, chuva	Obstruções, danos em vertedouro, erosão de coroamento	Avaliar capacidade de descarga e necessidade de operação preventiva ou PAE

Fonte: elaborado pelos autores.

3.3 TARPs

Trigger Action Response Plans (TARPs) são sequências logicas previamente definidas como gatilhos, ações e respostas. Sua função é estabelecer como o operador e a equipe técnica devem reagir quando uma leitura, tendência ou evidência de campo indicar desvio relevante. O *GISTM* define *TARPs* como ferramenta de gestão de controles, com níveis de ativação baseados em critérios de desempenho e controles críticos [10].

Mesmo em *Smart Dams*, limites e *TARPs* devem ser elaborados por engenheiros e profissionais habilitados, com critérios claros de engenharia e considerando as especificidades da estrutura. Sistemas inteligentes podem verificar limites, comparar tendências e emitir alertas; entretanto, a formulação dos critérios, sua revisão periódica e a responsabilidade técnica permanecem vinculadas à engenharia.

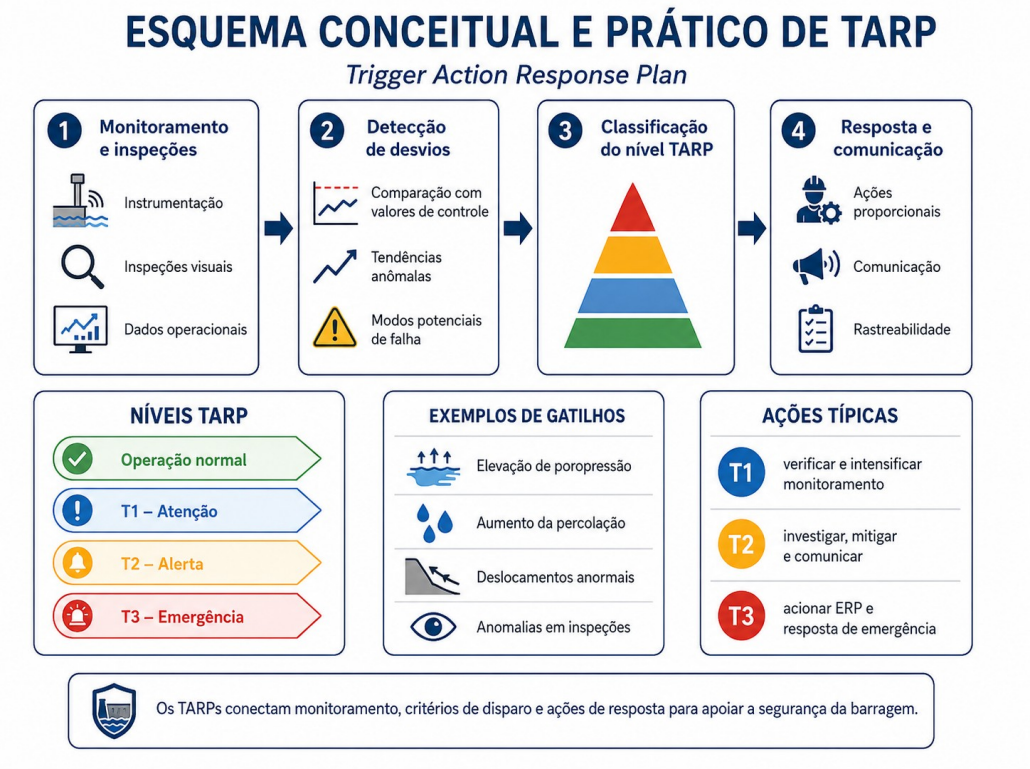


Figura 9 – Fluxo conceitual de *TARPs* no contexto do monitoramento de barragens.

Fonte: elaborado pelos autores.

A Figura 9 resume a lógica: monitoramento e inspeções geram dados; a detecção de desvios compara leituras com valores de controle, tendências e modos potenciais de falha; o nível TARP classifica a condição; e a resposta define ações proporcionais, comunicação e rastreabilidade. Essa estrutura conecta dado, diagnóstico e resposta, preparando a integração com *Smart Dams* [10, 11].

4. O PARADIGMA *SMART DAMS*

4.1 Definição conceitual

O conceito de *Smart Dam*, ou barragem inteligente, deve ser compreendido como uma evolução dos sistemas tradicionais de monitoramento e gestão da segurança de barragens. No capítulo introdutório deste artigo, a Figura 2, adaptada de [1], apresentou a vigilância, aqui tratada no contexto brasileiro como monitoramento em sentido amplo, como um processo composto por três fontes principais de informação: monitoramento por instrumentação, inspeção visual e verificações/testes. Nesse arranjo, dados e relatórios passam por análises preliminares e subsidiam a avaliação global da segurança da barragem. Essa concepção permanece válida e constitui a base da engenharia de segurança de barragens: a avaliação da segurança depende da integração entre dados da instrumentação, observações de campo, testes de equipamentos, documentação técnica e julgamento de engenharia. O [1] destaca que a vigilância deve permitir diagnóstico oportuno e preciso do comportamento da barragem, sendo planejada ou revisada com base nos modos potenciais de falha e nos níveis de risco associados.

O conceito *Smart Dam* não substitui esse processo; ele o amplia. A diferença fundamental está na introdução de uma camada digital e analítica capaz de integrar, processar e interpretar continuamente as informações provenientes da barragem física. Assim, enquanto o monitoramento convencional tende a organizar os dados em ciclos de coleta, verificação, análise preliminar e avaliação periódica, o conceito de *Smart Dam* propõe transformar esses dados em percepção abrangente, diagnóstico contínuo, simulação, previsão e suporte à decisão. Essa distinção é essencial para evitar a interpretação simplificada de que uma *Smart Dam* seria apenas uma barragem com leituras automáticas. A automatização da instrumentação é uma condição habilitadora, mas não suficiente. O conceito pleno exige integração entre a estrutura física, sensores, redes de comunicação, bancos de dados, modelos de comportamento, inteligência artificial, gêmeos digitais, valores de controle, *TARPs* e processos de tomada de decisão

Zhong et al. [3] propõem uma formulação sintética na qual a *Smart Dam* representa a evolução do monitoramento convencional incorporando tecnologias de nova geração, como Internet das Coisas IoT, tecnologias inteligentes, computação em nuvem e big data. Segundo os autores, a barragem inteligente constitui um sistema de gestão e operação dinâmico, refinado, perceptível, analisável e controlável, dotado de características como integralidade, interoperabilidade, capacidade de expansão, autonomia e robustez. Em termos práticos, essa definição permite distinguir três níveis conceituais: a barragem instrumentada, que dispõe de instrumentos para medição de grandezas físicas; a barragem digital, que integra dados, visualização e simulação; e a *Smart Dam*, que incorpora análise inteligente, reconstrução dinâmica da informação, decisão assistida ou autônoma e visualização integrada

A Figura 10 apresenta uma arquitetura conceitual de *Smart Dam* estruturada em camadas. Na base encontra-se o “espaço inteligente das barragens”, correspondente à barragem física, sua fundação, reservatório, estruturas associadas e ambiente de entorno. Essa camada é monitorada por uma etapa de “percepção ativa”, composta por sensores, instrumentação geotécnica, GNSS, sensoriamento remoto, dispositivos de identificação e interfaces de dados. No contexto deste artigo, é nessa camada que se insere a instrumentação geotécnica, piezômetros, medidores de vazão, inclinômetros, extensômetros, prismas topográficos, sensores de temperatura, medidores de deslocamentos e deformações e demais dispositivos responsáveis por transformar o comportamento físico da barragem em informação mensurável.

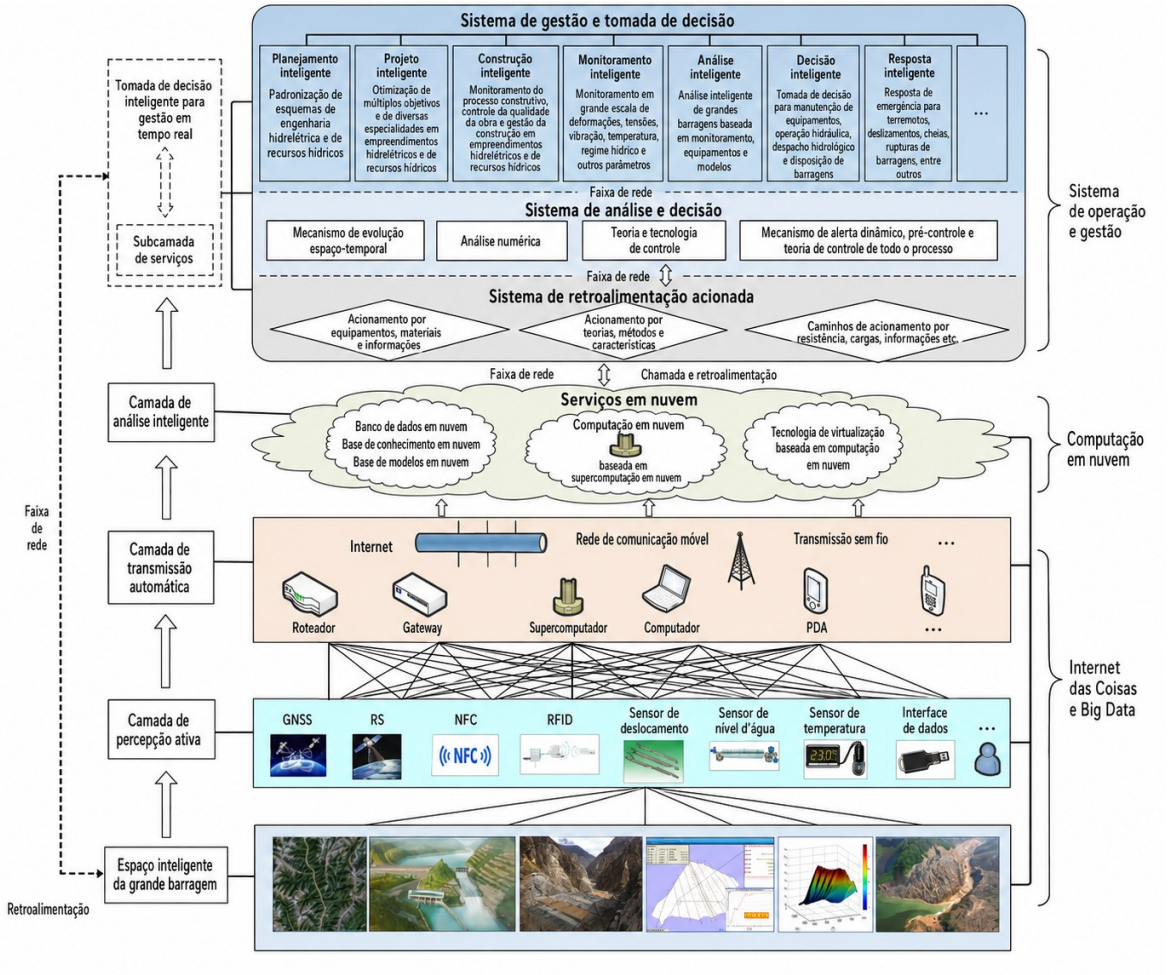


Figura 10 – Arquitetura conceitual em camadas para *Smart Dam*.

Fonte: adaptado de [3].

Acima da camada de “percepção ativa” situa-se a camada de “transmissão automática”, responsável por transferir os dados adquiridos por meio de redes cabeadas ou sem fio, gateways, roteadores, redes móveis e demais infraestruturas de comunicação. Essa camada permite que as informações deixem de ser registros isolados de campo e passem a alimentar bancos de dados e plataformas digitais. Em seguida, a arquitetura incorpora os “serviços em nuvem”, nos quais se concentram bases de dados, bases de conhecimento, bases de modelos, recursos computacionais e tecnologias de virtualização. Essa organização é coerente com a formulação de [3], que descreve a *Smart Dam* a partir de módulos de percepção em tempo real, transmissão interconectada, análise inteligente e sistema de gestão e decisão.

A camada superior, denominada “sistema de gestão e tomada de decisão”, é o ponto em que o conceito de *Smart Dam* mais se diferencia do conceito amplo de monitoramento convencional. Nessa camada são integradas funções como planejamento inteligente, projeto inteligente, construção inteligente, monitoramento inteligente, análise inteligente, decisão inteligente e resposta inteligente. A análise deixa de ser apenas uma etapa posterior à coleta de dados e passa a compor um processo contínuo de diagnóstico, simulação e retroalimentação. Os dados de instrumentação, inspeções e testes são processados por modelos numéricos, modelos estatísticos, modelos preditivos, regras de controle, acionam *TARPs* e são

retratados nos modelos de gêmeos digitais, permitindo avaliar tendências, identificar anomalias, comparar o comportamento observado com o comportamento esperado e apoiar decisões de segurança e operação.

O relatório "*Smart Dams: Concepts and Practices*" [2] aprofunda essa visão ao associar as barragens inteligentes a cinco propriedades funcionais: autopercepção, autodiagnóstico, autonomia de decisão, autoexecução e autoaprendizagem. A autopercepção corresponde à capacidade de perceber a barragem, suas estruturas associadas, equipamentos, ambiente e atividades humanas por meio de dispositivos internos e externos de percepção, operando de forma multinível, multidimensional e multiparamétrica. O autodiagnóstico consiste na análise autônoma da segurança, estabilidade, confiabilidade e desempenho funcional com base nas informações percebidas, podendo acionar alertas (*TARPs*) e subsidiar decisões. A autonomia de decisão integra dados, conhecimento de engenharia, modelos e simulações para gerar alternativas de ação e planos de resposta. A autoexecução refere-se à implementação de ações de inspeção, manutenção, reparo, resposta emergencial ou despacho operacional conforme regras estabelecidas. Por fim, a autoaprendizagem envolve o aprimoramento contínuo dos sistemas de percepção, diagnóstico, decisão e execução com base na experiência acumulada ao longo da operação.

Entretanto, no contexto da engenharia geotécnica de barragens, é necessário interpretar essas propriedades com prudência. Muitas variáveis críticas, como poropressões, vazões de percolação, deslocamentos internos e deformações, não são diretamente controláveis por atuadores, diferentemente de processos industriais clássicos (Automação industrial). Nesses casos, a "execução" não deve ser entendida como controle automático direto da variável geotécnica, mas como acionamento estruturado, auxiliar e informativo para respostas técnicas e operacionais, tais como intensificação do monitoramento, inspeção especial, verificação de instrumentos, revisão de modelos, alteração operacional, manutenção, intervenção ou eventual acionamento de planos de resposta *TARPs*.

Nesse sentido, as *TARPs "Trigger Action Response Plans"* constituem uma ferramenta relevante para materializar a ligação entre dado, gatilho, diagnóstico e ação. No contexto do GISTM, as *TARPs* são tratadas como instrumentos de gestão de controles e resposta a desvios de desempenho, o que é compatível com a lógica de *Smart Dams* quando aplicadas como regras operacionais associadas a valores de controle, evidências de inspeção e níveis de resposta.

Dessa forma, o conceito de *Smart Dam* pode ser definido, para os fins deste artigo, conforme [2] como um sistema ciberfísico de gestão de barragens que integra o ativo físico, instrumentação, inspeções, sensores, redes de comunicação, bancos de dados, modelos de comportamento, gêmeos digitais, *analytics*, valores de controle, *TARPs* e suporte à decisão, com o objetivo de ampliar a capacidade de percepção, diagnóstico, previsão e resposta. Essa definição mantém coerência com o conceito de vigilância do *ICOLD* [1], pois preserva a centralidade da inspeção visual, da instrumentação e da avaliação global da segurança, mas acrescenta uma camada de integração digital capaz de transformar o monitoramento em um processo mais contínuo, rastreável, preditivo e orientado à decisão.

4.3 IoT, BIM, gêmeos digitais e *analytics*

A consolidação do paradigma *Smart Dams* depende da integração entre tecnologias digitais que atuam em diferentes níveis do sistema de monitoramento e gestão. A Internet das Coisas (IoT) viabiliza a conexão entre sensores, *dataloggers, gateways*, redes de comunicação e plataformas de dados. O BIM, quando associado a bases GIS e cadastros técnicos, organiza informações geométricas, construtivas, documentais e operacionais do ativo. O *analytics* transforma dados brutos em informação interpretável por meio de estatística, modelos preditivos, detecção de anomalias e comparação com valores de controle. Já o gêmeo digital integra essas camadas em um ambiente dinâmico de representação, análise, simulação e suporte à decisão.

Nesse sentido, o gêmeo digital não deve ser tratado apenas como um modelo tridimensional da barragem. Sua função é integrar a representação física da estrutura com dados históricos, leituras em tempo quase real, inspeções, modelos de comportamento, cenários hidrológicos, mecanismos potenciais de falha, *TARPs*, planos de resposta e rotinas de gestão. Essa concepção está alinhada à formulação de Zhong et al. [3], segundo a qual a *Smart Dam* evolui da barragem digital ao incorporar IoT, computação em nuvem, big data e análise inteligente, formando um sistema com percepção em tempo real, transmissão interconectada, análise inteligente e gestão/decisão.

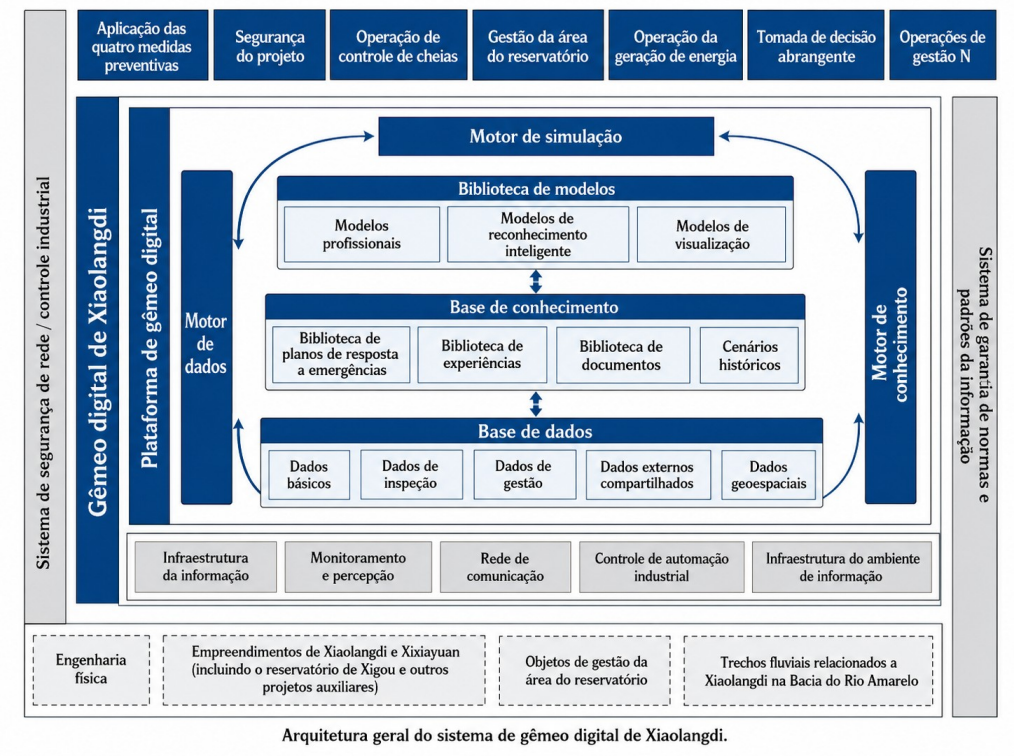


Figura 11 – Arquitetura geral do sistema de gêmeo digital de Xiaolangdi.

Fonte: adaptado de [2].

A Figura 11 ilustra uma arquitetura típica de gêmeo digital aplicada ao Projeto Xiaolangdi [2]. Observa-se que o sistema é estruturado sobre uma base física composta pelo empreendimento, seus objetos de gestão, trechos fluviais relacionados e infraestruturas de informação, monitoramento, comunicação e automação. Sobre

essa base são organizadas camadas de dados, conhecimento, modelos e simulação, que suportam aplicações como segurança do projeto, controle de cheias, gestão do reservatório, operação da geração de energia e tomada de decisão abrangente. O relatório "*Smart Dams: Concepts and Practices*" [2] destaca que o gêmeo digital de Xiaolangdi foi concebido com base em BIM+GIS, banco de dados abrangente, biblioteca de modelos profissionais e modelos de inteligência artificial, com foco nas "Quatro Medidas Preventivas" e na gestão multiobjetivo [2].



Figura 12 – Interface do gêmeo digital da Barragem de Danjiangkou aplicada à gestão da segurança.

Fonte: adaptado de [12].

A Figura 12 apresenta uma interface do gêmeo digital da Barragem de Danjiangkou, voltada à gestão da segurança e à operação integrada. A imagem evidencia a organização de módulos como segurança da barragem, segurança da qualidade da água, segurança do reservatório, controle de cheias, abastecimento de água e tomada de decisão. Também são apresentados recursos de seleção de cenários, visualização do monitoramento, simulação em tempo real, previsão futura, projeção de cenários e planos de contingência. Esse tipo de ambiente demonstra que o gêmeo digital funciona como uma plataforma de integração entre observação, modelagem e decisão, e não apenas como um visualizador gráfico da estrutura.

A integração entre IoT, BIM, gêmeo digital e *analytics* também exige uma arquitetura de dados confiável. Leituras de piezômetros, medidores de vazão, inclinômetros, marcos superficiais, pluviômetros e sensores ambientais somente produzem valor quando passam por validação, contextualização e comparação com critérios de desempenho. Assim, a camada analítica deve incorporar rotinas de controle de qualidade, identificação de falhas instrumentais, análise de tendências, correlação com variáveis externas, previsão de comportamento e classificação de desvios. Os valores de controle e as *TARPs* cumprem papel essencial nessa transição, pois permitem associar desvios observados a níveis de resposta previamente definidos.

A literatura recente sobre barragens inteligentes e gêmeos digitais também ressalta desafios que extrapolam a engenharia geotécnica tradicional. A digitalização amplia a

capacidade de diagnóstico e simulação, mas introduz novas demandas relacionadas à governança de dados, interoperabilidade, cibersegurança, gestão do ciclo de vida de softwares, rastreabilidade de decisões e responsabilidade por alertas ou recomendações automatizadas [13, 14]. Esses aspectos são particularmente relevantes quando os dados alimentam modelos preditivos, sistemas de alerta, decisões operacionais ou planos de resposta.

Portanto, o gêmeo digital de uma barragem deve ser entendido como um ambiente de integração técnica e decisória. Sua efetividade depende da qualidade da instrumentação, da confiabilidade metrológica dos dados, da integração com inspeções visuais, da consistência dos modelos, da definição de critérios de desempenho e da governança dos processos de decisão. No contexto das *Smart Dams*, IoT, BIM, *analytics* e gêmeos digitais não são tecnologias isoladas, mas componentes complementares de um sistema ciberfísico voltado à percepção, diagnóstico, previsão, simulação e suporte à decisão.

5. PANORAMA BRASILEIRO E DESAFIOS DE IMPLEMENTAÇÃO

5.1 Avanços nacionais

O Brasil já possui experiências relevantes de automatização da instrumentação de barragens, especialmente no setor de mineração e, de forma crescente, no setor elétrico. Embora o conceito de *Smart Dams* ainda esteja em processo de consolidação no país, a engenharia brasileira não parte de uma condição inicial. Há um patrimônio técnico importante composto por barragens instrumentadas há décadas, séries históricas extensas, equipes especializadas, manuais de monitoramento, plataformas de gestão de segurança e projetos recentes de modernização dos sistemas de aquisição e transmissão de dados.

No setor elétrico, destacam-se experiências de automatização parcial ou ampla da instrumentação em usinas hidrelétricas, envolvendo piezômetros, medidores de vazão, indicadores de nível d'água, extensômetros, pêndulos, medidores triortogonais, termômetros e outros dispositivos. A Tabela 3 apresenta exemplos de empreendimentos brasileiros que tiveram instrumentos automatizados ou semiautomatizados, evidenciando que a modernização do monitoramento vem ocorrendo de forma progressiva em diferentes empresas e regiões do país [15].

Tabela 3 – Exemplos de barragens de usinas hidrelétricas brasileiras que tiveram sua instrumentação automatizada até 2023.

Barragem	Empresa	Ano	Tipo de Instrumentos automatizados
UHE Queimado	CEMIG GT	2023	PZ, MV e INA
UHE Ilha Solteira	CTG Brasil	2022	PZ, MV, MN, MT e EH
UHE Salto	CTG Brasil	2021	PZ, MV e MN
UHE Três Marias	CEMIG GT	2020	PZ, MV e MN
PCH Piau	CEMIG GT	2019	PZ, MV e MN
UHE Irapé	CEMIG GT	2018	PZ, MV e CW
UHE Miranda	CEMIG GT	2017	PZ, MV, PD, MT e EH
UHE Foz do Chapecó	Foz do Chapecó Energia S.A.	2015	PZ, MT, EH
UHE Barra Grande	Energética Barra	2015	PZ, MV, MT, EH, MR

Barragem	Empresa	Ano	Tipo de Instrumentos automatizados
	Grande S.A.		
UHE Porto Primavera	CESP	2007	PZ, MV, MT, EH, PD e PI
Itaipu	ITAIPU Binacional	2005	PZ, MV, PE, EH, PD e PI
UHE Sobradinho	CHESF	2003	PZ e MV

Fonte: [15].

Legenda: PZ - piezômetro; MV - medidor de vazão; INA - indicador de nível d'água; EH - extensômetro de haste; PD - pêndulo direto; PI - pêndulo invertido; MT - medidor triortogonal; PE - piezômetro elétrico; MN - medidor de nível; TT - termômetro/termistores; CW - célula de pressão.

Entre os casos documentados, a UHE Ilha Solteira constitui exemplo relevante de modernização da instrumentação em uma estrutura hidrelétrica de grande porte. Ramos et al. [16] descrevem a automatização de instrumentos de monitoramento com integração a sistemas de transmissão e plataformas de gestão, abrangendo piezômetros, medidores de vazão e medidores de junta triortogonais. O caso demonstra que a automatização pode melhorar a frequência de aquisição, reduzir etapas manuais, ampliar a rastreabilidade dos dados e facilitar o acompanhamento do comportamento da estrutura, desde que associada a procedimentos de validação, manutenção e interpretação técnica.

Também são relevantes os projetos conduzidos pela CEMIG GT, que incluem experiências sucessivas de automatização da instrumentação civil em barragens de terra e enrocamento. Salomão e Melo [17] destacam lições aprendidas relacionadas à seleção de sensores, calibração, proteção física dos equipamentos, comunicação, infraestrutura de campo, integração com sistemas corporativos e manutenção preventiva. Essas experiências são particularmente importantes porque revelam que a modernização tecnológica envolve não apenas sensores e *dataloggers*, mas também especificação técnica, logística de instalação, confiabilidade de comunicação, proteção contra vandalismo, capacitação das equipes e gestão contínua do sistema.

Além dos casos de implantação em empreendimentos existentes, há iniciativas de desenvolvimento tecnológico nacional voltadas à aquisição de dados, IoT e sistemas de baixo custo para monitoramento de barragens. Bastos [15] apresenta o desenvolvimento de soluções nacionais para aquisição de dados aplicadas ao monitoramento geotécnico, incluindo leitura de sensores de corda vibrante e recursos para apoio à semi-automatização de procedimentos de campo (Teste de equalização do tipo dissipação em piezômetros *Standpipe*). Esse tipo de iniciativa é estratégico para reduzir a dependência de equipamentos importados, ampliar a aderência às condições brasileiras e fomentar soluções mais acessíveis para empreendimentos de diferentes portes.

Esses avanços mostram que a engenharia brasileira já superou, em muitos casos, a etapa de monitoramento exclusivamente manual. Entretanto, a maior parte das iniciativas ainda se concentra na automatização da aquisição, transmissão e visualização de dados. O desafio técnico atual é evoluir para sistemas capazes de integrar dados instrumentais, inspeções visuais, valores de controle, *TARPs*, modelos

de comportamento e rotinas de diagnóstico. Em outras palavras, o país dispõe de dados, instrumentos e experiência operacional; a lacuna principal está em transformar essa base em interpretação estruturada, tempestiva e integrada ao processo decisório.

Nesse contexto, a transição para *Smart Dams* no Brasil deve ser compreendida como uma evolução incremental. O primeiro avanço é garantir instrumentação confiável e dados validados; o segundo é integrar esses dados a plataformas digitais; o terceiro é associá-los a limites de desempenho, modelos preditivos, inspeções e planos de resposta. A consolidação do paradigma *Smart Dams* dependerá, portanto, menos da simples ampliação do número de sensores e mais da capacidade de organizar a informação em sistemas de diagnóstico, alerta e suporte à decisão tecnicamente consistentes.

5.2 Limitações atuais

Apesar dos avanços recentes, a implementação do conceito de *Smart Dams* no Brasil ainda enfrenta limitações técnicas, operacionais e institucionais. A primeira delas está relacionada à confiabilidade metrológica. Sistemas automatizados somente agregam valor quando os dados são calibrados, rastreáveis, validados e tecnicamente interpretáveis. Erros de instalação, deriva de sensores, ruído, falhas de compensação térmica, perda de comunicação, ausência de leitura manual de verificação e manutenção insuficiente podem comprometer a qualidade das séries históricas e induzir diagnósticos incorretos.

Outra limitação relevante é a integração das bases de dados. Em muitos empreendimentos, dados de instrumentação, inspeções visuais, registros operacionais, documentos de projeto, relatórios de segurança, manuais de monitoramento e planos de ação permanecem distribuídos em sistemas distintos. Essa fragmentação dificulta a análise integrada do comportamento da barragem e reduz a capacidade de resposta diante de anomalias. A transição para *Smart Dams* exige que essas informações sejam estruturadas em bases consistentes, interoperáveis e auditáveis.

Também se observa autonomia analítica limitada nos sistemas atualmente implantados. Grande parte das plataformas digitais concentra-se na aquisição, transmissão, armazenamento e visualização das leituras, mas ainda apresenta baixa capacidade de validação automática, detecção de anomalias, correlação entre variáveis, análise preditiva e suporte à decisão. Assim, a modernização tecnológica nem sempre reduz o intervalo entre a medição e a interpretação de engenharia. O desafio permanece em transformar dados frequentes em diagnóstico oportuno.

Os custos de implantação e manutenção constituem outro fator limitante. A automatização envolve sensores, *dataloggers*, infraestrutura de comunicação, alimentação elétrica, proteção física, licenças de software, servidores, calibração, manutenção preventiva e equipes especializadas. Além disso, a dependência de equipamentos importados pode gerar aumento de custos, prazos elevados de reposição, dificuldades de suporte técnico e limitações para customização às condições brasileiras. Em áreas remotas, somam-se desafios de comunicação, energia, vandalismo, intempéries, descargas atmosféricas e dificuldade de acesso.

A digitalização também introduz novas responsabilidades. A literatura recente sobre barragens inteligentes e gêmeos digitais destaca que sistemas digitais ampliam a capacidade de monitoramento, mas criam riscos associados à governança de dados, interoperabilidade, ciclo de vida de softwares, cibersegurança e responsabilidade por recomendações ou alertas automatizados [13, 14]. Em sistemas nos quais dados de instrumentação alimentam modelos preditivos, alarmes, *TARPs* ou gêmeos digitais, torna-se necessário definir propriedade dos dados, critérios de acesso, rastreabilidade, segurança da informação, validação dos modelos e responsabilidades técnicas pela tomada de decisão.

Por fim, há uma limitação de capacitação multidisciplinar. *Smart Dams* exigem profissionais capazes de atuar na interface entre geotecnia, estruturas, hidráulica, instrumentação, automação, ciência de dados, TI, cibersegurança e gestão de riscos. A dificuldade não está apenas em instalar sensores, mas em estruturar processos confiáveis para interpretar dados, comunicar desvios e orientar respostas. Portanto, a digitalização cria oportunidades, mas também amplia a necessidade de governança técnica e institucional.

6. PROPOSTA DE MATRIZ DE MATURIDADE PARA *SMART DAMS*

A evolução para o conceito de *Smart Dam* pode ser organizada por meio de uma matriz de maturidade, entendida como uma síntese prática dos estágios de desenvolvimento dos sistemas de monitoramento, gestão de dados, diagnóstico e suporte à decisão em barragens. Essa matriz não tem caráter normativo, mas busca oferecer uma estrutura conceitual para diferenciar barragens apenas instrumentadas, barragens com aquisição automatizada, sistemas digitalmente integrados e *Smart Dams* em sentido pleno.

A proposta apresentada na Tabela 4 considera cinco níveis evolutivos. O primeiro corresponde ao monitoramento convencional, baseado em leituras manuais, inspeções periódicas e análise técnica posterior. O segundo representa a automatização da aquisição, com sensores, transdutores, *dataloggers* e telemetria. O terceiro incorpora plataformas digitais de gestão, dashboards, integração documental e alarmes básicos. O quarto nível é definido como monitoramento orientado por modos de falha e desempenho, no qual instrumentos, inspeções, valores de controle e respostas são estruturados a partir de mecanismos físicos monitoráveis, condições de desempenho e *TARPs*. Por fim, o quinto nível corresponde à *Smart Dam* plena, caracterizada por gêmeo digital, previsão, simulação, alerta antecipado, suporte à decisão, governança de dados e aprendizagem contínua.

Essa abordagem evita tratar a *Smart Dam* apenas como uma barragem automatizada ou com visualização digital. A principal diferença entre os níveis está na capacidade de transformar dados em diagnóstico técnico e resposta. Assim, a matriz reforça que a maturidade não depende apenas da quantidade de sensores instalados, mas da qualidade dos dados, da integração entre instrumentação e inspeção, da existência de critérios de desempenho, da validação metrológica, da rastreabilidade das decisões e da governança do sistema.

Tabela 4 – Matriz de maturidade proposta para *Smart Dams*.

Nível	Caracterização	Elemento dominante	Limitação típica
1 – Monitoramento convencional	Leituras manuais, inspeções periódicas, planilhas, relatórios e análise técnica em ciclos definidos.	Instrumentação e inspeção tradicionais	Baixa frequência de dados, maior tempo entre leitura e interpretação e dependência de rotinas manuais
2 – Automatização da aquisição	Sensores, transdutores, *dataloggers*, telemetria e aquisição remota de dados.	Disponibilidade e frequência de dados	Análise ainda predominantemente manual e dependente de validação posterior
3 – Gestão digital integrada	Banco de dados, dashboards, gestão documental, alarmes simples, histórico digital e integração inicial com inspeções visuais.	Plataforma de gestão	Diagnóstico limitado, baixa associação com mecanismos de comportamento e risco de alarmes pouco contextualizados
4 – Monitoramento orientado por modos de falha e desempenho	Instrumentos, inspeções, valores de controle, limites de desempenho e respostas definidos com base em mecanismos monitoráveis, condições de desempenho e *TARPs*.	Diagnóstico por mecanismo e resposta estruturada	Exige dados confiáveis, sequência lógica de diagnóstico, validação contínua, equipe multidisciplinar e rotinas de resposta bem definidas
5 – *Smart Dam* plena	Gêmeo digital, previsão, alerta antecipado, simulação, suporte à decisão, governança de dados, cibersegurança e aprendizagem contínua.	Sistema ciberfísico inteligente	Maior complexidade de implantação, interoperabilidade, governança, cibersegurança, manutenção e responsabilização técnica

Fonte: elaborado pelos autores.

A matriz proposta permite posicionar o panorama brasileiro de forma construtiva. O país já possui avanços relevantes nos níveis 1, 2 e, em alguns casos, no nível 3, especialmente pela existência de barragens instrumentadas, séries históricas extensas, equipes experientes, projetos de automatização e plataformas digitais de gestão. Entretanto, a consolidação do nível 4 ainda exige maior integração entre instrumentos, inspeções, valores de controle, *TARP*s, modos potenciais de falha e análise de desempenho. O nível 5, por sua vez, depende da evolução para ambientes ciberfísicos com gêmeos digitais, analytics, simulação, governança de dados, cibersegurança e suporte estruturado à decisão.

Dessa forma, a matriz de maturidade reforça a mensagem central do artigo: a *Smart Dam* plena não é definida pela automação da leitura, mas pela integração entre percepção, validação, diagnóstico, previsão, resposta e aprendizagem. Para a engenharia brasileira, o caminho mais consistente é evoluir de forma incremental, consolidando a qualidade dos dados e a interpretação por mecanismos antes de avançar para modelos mais complexos de gêmeos digitais e decisão assistida.

7. CONCLUSÕES

As *Smart Dams* representam mais que a automatização da leitura de instrumentos. O conceito envolve a construção de sistemas integrados de percepção, diagnóstico, previsão, simulação e suporte à decisão, nos quais dados de campo são transformados em informação técnica rastreável e acionável.

A instrumentação geotécnica constitui a camada sensorial principal desse processo, pois registra grandezas fundamentais ao comportamento hidráulico, geotécnico e estrutural da barragem. Entretanto, sua efetividade depende da integração com inspeções visuais, verificações de campo, validação metrológica, gestão documental e interpretação de engenharia.

O Brasil possui avanços relevantes em automatização da instrumentação, plataformas digitais e desenvolvimento tecnológico nacional. Há barragens com séries históricas extensas, equipes qualificadas, manuais de monitoramento e experiências documentadas de modernização. Portanto, a engenharia brasileira não parte do zero.

Os principais desafios estão na evolução da disponibilidade de dados para a interpretação estruturada e tempestiva. Para consolidar o paradigma *Smart Dams,* será necessário avançar em gerenciamento e confiabilidade metrológica, integração entre bases de dados, autonomia analítica, padronização de valores de controle, implementação de *TARPs*, governança da informação, cibersegurança, interoperabilidade e capacitação multidisciplinar.

Conclui-se que a transição para *Smart Dams* deve ser conduzida de forma incremental e tecnicamente fundamentada. A prioridade não deve ser apenas ampliar o número de sensores, mas qualificar os dados, integrar instrumentos e inspeções, associar leituras a mecanismos físicos, estabelecer respostas proporcionais e construir sistemas digitais capazes de apoiar, sem substituir, o julgamento de engenharia e a responsabilidade técnica pela segurança das barragens.

8. PALAVRAS-CHAVE

Smart Dams; instrumentação geotécnica; *TARPs*; gêmeo digital; monitoramento de barragens.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ICOLD (2018) – "*Bulletin 158: Dam Surveillance Guide*", *International Commission on Large Dams*, Paris.

[2] MWR; IWHR (2025) – "*Smart Dams: Concepts and Practices*", *China Water & Power Press*, Beijing, relatório apresentado no 28th ICOLD Congress.

[3] ZHONG, D.; WANG, F.; WU, B.; CUI, B.; LIU, Y. (2015) – "*From digital dam toward smart dam", Journal of Hydroelectric Engineering*, v. 34, n. 10, DOI: 10.11660/slfdxb.20151001.

[4] ICOLD (2000) – "*Bulletin 118: Automated Dam Monitoring Systems: Guidelines and Case Histories", International Commission on Large Dams*, Paris.

[5] DUNNICLIFF, J. (1993) – "*Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*", John Wiley & Sons, New York.

[6] SILVEIRA, J. F. A. (2006) – "Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento", Oficina de Textos, São Paulo.

[7] USACE (2020) – "*EM 1110-2-1908: Instrumentation of Embankment Dams and Levees*", *U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC*.

[8] BASTOS, W. S. et al. (2025) – "*Critical aspects of using vibrating wire piezometers in geotechnical monitoring of dams*", *Fifth International Dam World Conference*, Lisboa: LNEC.

[9] VASCONCELLOS FILHO, T. M. et al. (2023) – "Discussão sobre valores de controle para a instrumentação de barragens", XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu: CBDB.

[10] ICMM; UNEP; PRI (2020) – "*Global Industry Standard on Tailings Management*", ICMM, London.

[11] RUDY, A.; MORALES, L. (2022) – "*Proposed methodologies for dictation of trigger levels and response plans for tailings dams in Mexico*", XXXI *National Meeting of Geotechnical Engineering*, Guadalajara.

[12] DING, S.-L.; PAN, J.-J.; WANG, Y.; XU, H.; LI, D.-Q.; LIU, X. (2025) – "*Developing a digital twin for dam safety management*", *Computers and Geotechnics*, v. 180, article 107120, DOI: 10.1016/j.compgeo.2025.107120.

[13] CARRIEANN (2025) – "*Smart dams and digital twins: managing risk and modernisation in hydropower", International Water Power & Dam Construction*, 15 out. 2025.

[14] DENTONS (2025) – "*Smart dams and digital twins: re-imagining water infrastructure in the age of AI*", Dentons Insights, 15 out. 2025.

[15] BASTOS, W. S. (2024) – "Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados universal para monitoramento de barragens", Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte.

[16] RAMOS, J. et al. (2023) – "Automatização de instrumentos de monitoramento na UHE Ilha Solteira", XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu: CBDB.

[17] SALOMÃO, A.; MELO, A. V. (2023) – "Automatização da instrumentação civil de uma barragem de terra e enrocamento: lições aprendidas", XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu: CBDB.

FOTO 3x4	**Wellerson BASTOS** (*CURRÍCULO - máx. 400 caracteres sem espaços)* Atenção: caso os 400 caracteres sejam excedidos o artigo será devolvido Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. ulpa q officia deserunt mollit anim id est laborum. Duis iru dolor.

FOTO 3x4	**Nome SOBRENOME** Podem

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.