CIGB
ICOLD
CBDB

SEMANA DE BARRAGENS 2026

DAMSWEEK 2026

ANAIS

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS



I SIMPÓSIO SOBRE
SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

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.

SR.1	**Investigações, Ensaios e Propriedades de Engenharia** **Relator(es): Fernanda Gouveia e Débora Dias**
SR.2	**Considerações de Projeto como fundação ou material de aterro** **Relator(es): Cássio Baumgratz Viotti**

SUMÁRIO

TEMA SR.1 – INVESTIGAÇÕES, ENSAIOS E PROPRIEDADES DE ENGENHARIA

1 - RELATO DO TEMA..... 7

2 - A VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO GPR EM BARRAGENS DE TERRA: ESTUDO DE CASO NA BARRAGEM DE SANTA CRUZ DO TRAIRI, RN..... 18

3 - AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE REJEITO AURÍFERO DE FLOTAÇÃO: DIFERENÇAS ENTRE O ESTUDO DE VIABILIDADE E O PRIMEIRO ANO DE OPERAÇÃO..... 37

4 - AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE REJEITOS CIANETADOS: ANÁLISE DAS VARIAÇÕES AO LONGO DO PRIMEIRO ANO DE OPERAÇÃO..... 48

5 - CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE SOLOS DE ALTERAÇÃO FILITO DOLOMÍTICO NA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM..... 65

6 - INFLUÊNCIA DE CANALÍCULOS NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DA FUNDAÇÃO DE BARRAGEM - DIQUE 11 – BELO MONTE..... 83

7 - MODELO DE CAMPO DE FASE PARA FRATURAS PRESSURIZADAS APLICADO A PROBLEMAS DE ENGENHARIA DE BARRAGENS..... 101

TEMA SR.2 – CONSIDERAÇÕES DE PROJETO COMO FUNDAÇÃO OU MATERIAL DE ATERRO

1 - RELATO DO TEMA..... 115

2 - ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS DA FUNDAÇÃO DOS DIQUES DE SELA DA BARRAGEM DO MIRIM, MINA DO SALOBO – SUDESTE DO ESTADO DO PARÁ..... 137

3 - BARRAGENS DE TERRA COM SOLOS TROPICAIS. O DESEMPENHO DE UM PROJETO DE KARL TERZAGHI..... 154

4 - COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO RESIDUAL DE FILITO COMO ATERRO COMPACTADO E COMO FUNDAÇÃO DE BARRAGEM..... 170

5 - EROSÕES INTERNAS EM BARRAGENS DE TERRA - CASO GRANJEIRO..... 185

6 - FUNDAÇÃO ROCHOSA DA BARRAGEM DO MIRIM: ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS – MINA DO SALOBO, SUDESTE DO ESTADO DO PARÁ..... 205

7 - SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS DAS ROCHAS METAMÓRFICAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO. DISCUSSÃO SOBRE NOMENCLATURA VISANDO UNIFICAÇÃO DE CONCEITOS PARA MODELAGEM GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA..... 225

8 - UHE BELO MONTE - CANALÍCULOS NAS FUNDAÇÕES DE DIQUES E BARRAGENS: DESAFIOS NA ETAPA DE OPERAÇÃO..... 246

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

SEMANA DE BARRAGENS 2026 DAMSWEEK 2026

INVESTIGATIONS, TESTS AND ENGINEERING PROPERTIES OF TROPICAL RESIDUAL SOILS (TRS)

Profª. Drª. Fernanda Gouveia

Graduate Program in Dam Engineering and Environmental Management

Federal University of Para - UFPA/ Tucuruí

1- Introduction



Soils developed in tropical areas through in situ weathering, leading to the complete alteration of the original rock texture. In certain cases, the remnants of the initial rock structures may be preserved (ICOLD, 2025).



is commonly found in tropical and subtropical climate regions (Schnaid and Milititsky, 1998), and is strongly influenced by intense weathering.

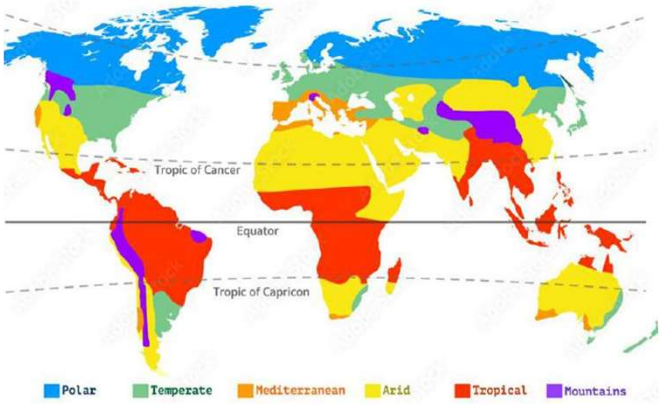
Peculiar geotechnical properties

1- Introduction

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

Climate zones of the world e global distribution of tropical residual soils (red)

.



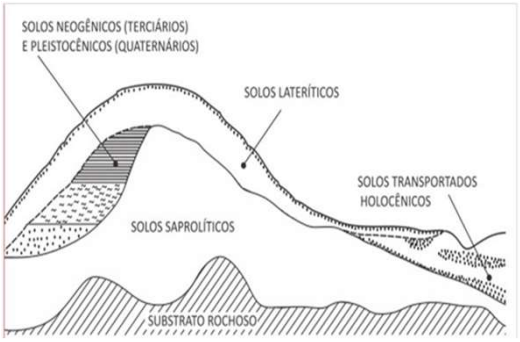
Apud ICOLD (2025).

1- Introduction

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- **Weathering profile**

Typical term for residual soil layers in tropical regions.



Villibor et al (2009).

Occurrence of lateritic soils in Brazil.



(Villibor e Nogami, 2009).

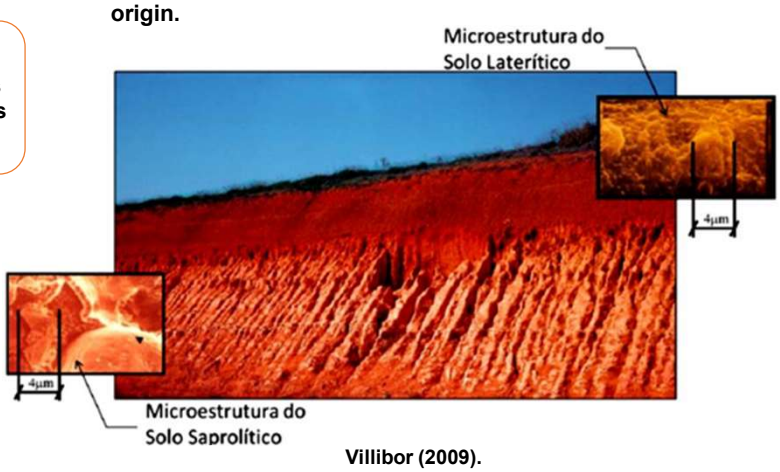
1- Introduction

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- **Weathering profile**

Laterização: processo em que chuvas e calor lavam nutrientes solúveis e deixam resíduos ricos em ferro e alumínio

Lateritic layer above a saprolitic layer of sedimentary origin.



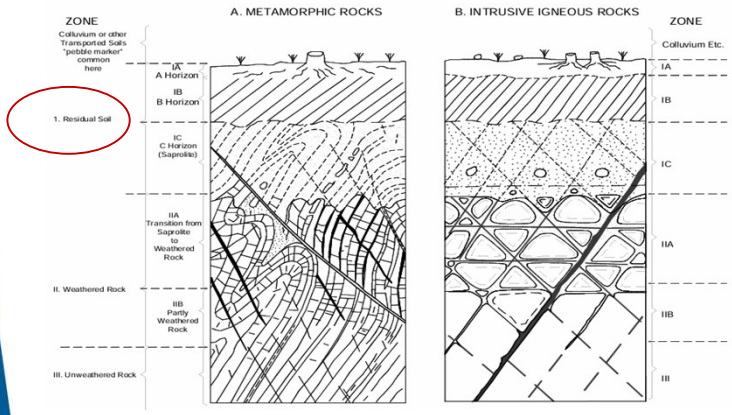
Villibor (2009).

1- Introduction

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

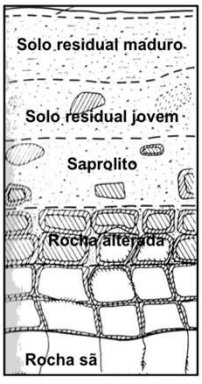
- **Weathering profile**

Typical Weathering profile for igneous and metamorphic rocks.



Deere and Patton (1971).

Soil weathering profile



(Mitchell, 1994).

2- Properties of Tropical Residual Soils (TRS)

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- **TRS have particularities in both their physical-chemical properties and hydromechanical behavior, as a result of geological and/or pedological processes in humid tropical regions (Committee on Tropical Soils of ISSMFE, 1985).**

Mineralogy and plasticity	Porosity and structure	Permeabilidade	Resistência e Deformabilidade
• They contain iron and aluminum oxides and hydroxides, as well as kaolinites, which alters the consistency limits (Atterberg) compared to clays from temperate climates.	• The clay particles bind together forming small clods or resulting microaggregates (rich in iron and aluminum oxides).	• Preferential flow channels, due to their porous microstructure, affect hydraulic conductivity.	• They have high apparent mechanical strength when dry or unsaturated, but may suffer structural collapse or significant loss of strength when saturated.

2- Properties of Tropical Residual Soils (TRS)

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

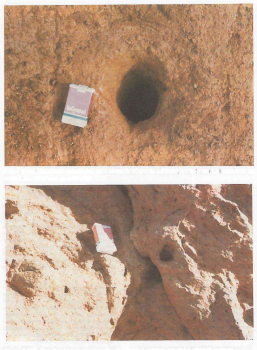
- **Tubular cavities (canaliculi)**

Dam in Rondônia, Brasil.



(Vilhena, 2024).

UHE Tucuruí, Pará, Brasil.



(Eletronorte, 1989).

UHE Belo Monte, Altamira, Brasil.



Rodrigues et al, 2026).

The roots of certain plants and organisms (earthworms, termites, and ants) play a vital role in soil development. They alter soil porosity, increasing permeability to water and gases (Norte Energia, 2022).

4 – Ensaios para Solos Tropicais

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

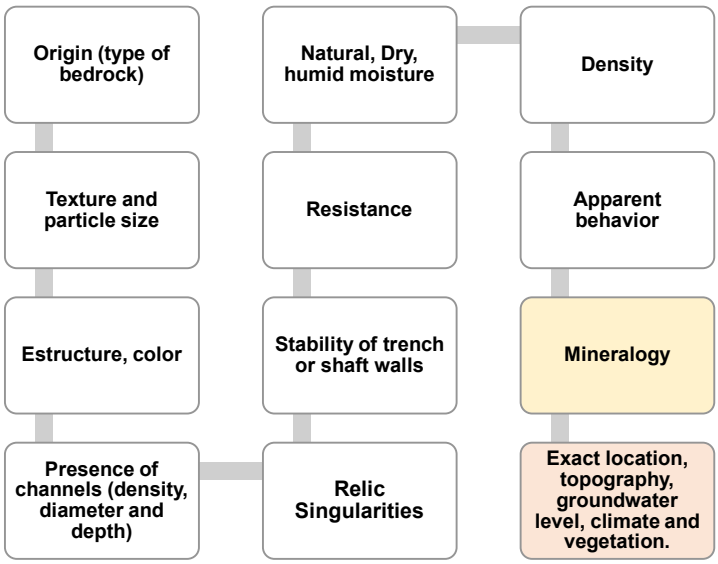
- TRS have quite peculiar properties and behaviors when compared to those from temperate climate regions, where conventional systems that adequately represent the behavior of saturated soils were developed (classical soil mechanics).
- TRS trials should present local and specific approaches
- Professional experience plays a dominant role in geotechnical engineering projects in residual soils, and careful observation of soil behavior in the field is an essential element for developing a sound analysis (Wesley, 2010).



4 – Tests for tropical soils

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

According to ICOLD (2025), the information that should be collected in the field includes these aspects, to be obtained directly site or in the laboratory through samples:



4 – Tests for tropical soils

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

Sampling (ICOLD, 2025):

- Laboratory strength assessment requires manually cut samples from test pits or trenches Large samples should be collected to ensure that variables such as structure and relict characteristics are representative.
- It is essential to adjust the sampling frequency according to the variability of the soil. The more heterogeneous the soil, the greater the number of samples and the denser the sampling grid.
- Special care should be taken to preserve the moisture content of the sample in situ, especially when the soil contains the minerals halloysite and allophane, as irreversible changes can occur if the material is allowed to desiccate.
- Distinguish between samples collected below the water table and those collected above (in this case, it is necessary to observe whether the sample was collected during the dry or rainy season).



4 – Tests for tropical soils

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

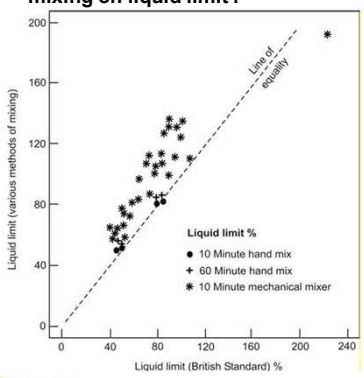
- **Investigation:** (CPT, CPTu), dilatometer (DMT). Robertson (2015) notes that both CPT and DMT have their respective advantages and limitations.
- **Traditional Laboratory Physical Tests**: particle size analysis, specific gravity, and consistency limits.
- **Mineralogical tests**: DR-X. Define the atypical mechanical and hydrological behavior of these materials, which do not follow the patterns of soils from temperate regions.
- **Suction tests** (retention curve or characteristic curve): suction plate, WP4C, filter paper. As most of these soils are unsaturated, seasonal variations in moisture, drastically alter suction and soil resistance parameters.

4 – Tests for tropical soils

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

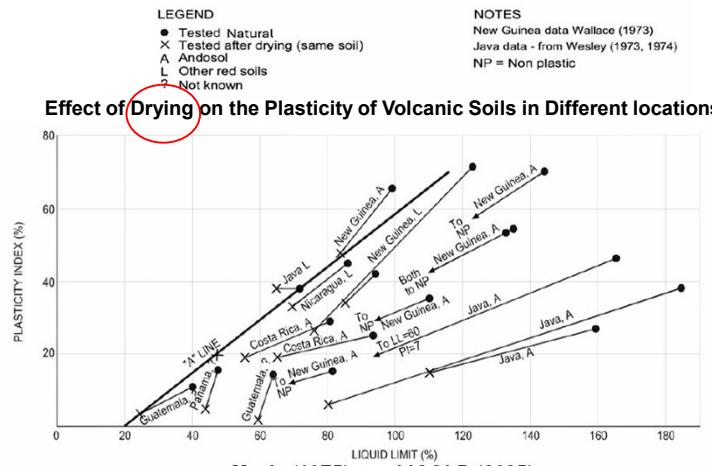
- **Traditional Laboratory Physical Tests (observation)**

Effect of mixing time and method of mixing on liquid limit .



Blight & Leong (2012) apud ICOLD (2025).

Effect of Drying on the Plasticity of Volcanic Soils in Different locations.



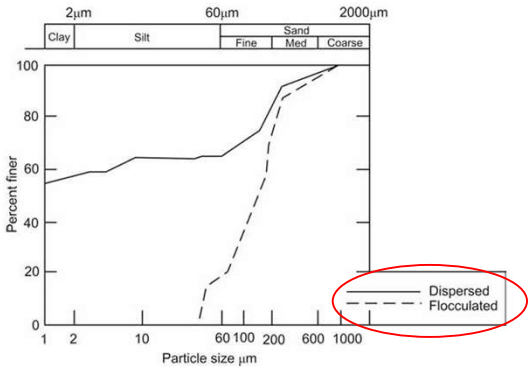
Morin (1975) apud ICOLD (2025).

4 – Tests for tropical soils

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

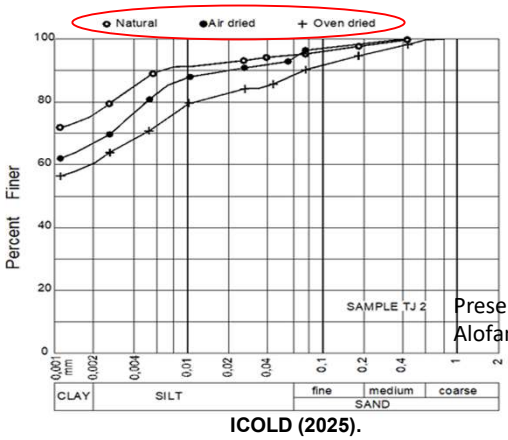
- **Traditional Laboratory Physical Tests (observation)**

Example of particle size analysis for a lateritic soil.



Blight & Leong (2012) apud ICOLD (2025).

Particle Size Distribution for Residual Soils Found Cipanunjang Dam, Indonesia



Presença de Alofana

ICOLD (2025).

4 – Tests for tropical soils

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

Permeability tests: triaxial tests, oedometry, or Rowe cells. It can also be obtained using flexible wall permeameters (laboratory), Guelph permeameter, and inverted well tests (in situ). Extrapolation to in situ permeabilities from laboratory permeations of materials for tropical residual soils should be done with extreme caution (Huat, Toll & Prasad, 2013).

Strength tests: direct shear, triaxial tests. Limitations in terms of scale factor and representativeness

Geophysical surveys: can complement drilling in determining the position of bedrock on a large scale; resistivity surveys can be used to obtain information on the depth of the water table (ICOLD, 2025).

4 – Tests for tropical soils

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

Strength tests (observations):

In residual tropical clay soils and unsaturated tropical lateritic soils (the condition of many slopes in our region), drained and undrained conditions are similar (c ≈ c' and ϕ ≈ ϕ'), that is, similar effective and total conditions (Berbearian, 2015).

- Microagregação e alta permeabilidade;
- baixa geração de poropressão ($\Delta u \approx 0$)
- argilominerais de baixa atividade coloidal
- Sob carregamentos rápidos (comportamento não drenado), a rigidez estrutural imposta pela sucção e pela cimentação impede o colapso imediato da estrutura, mantendo a resposta mecânica muito próxima da condição drenada.



5 – DW26 Paper

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS



COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS
TEMA SR.1
BELÉM – PA, 23 DE SETEMBRO DE 2026

INFLUÊNCIA DE CANALÍCULOS NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DA FUNDAÇÃO DE BARRAGEM - DIQUE 11 – BELO MONTE

Rodrigo de Lima RODRIGUES
Mestre – Itaipu Parquetec

Débora de Oliveira FERNANDES
Mestre – Itaipu Parquetec

Adriana Elisabete LIMBERGER
Mestre – Itaipu Parquetec

Patrícia Casarotto OLIVEIRA
Doutora – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

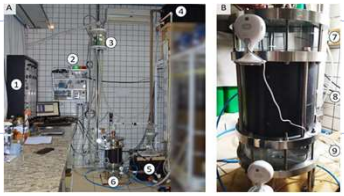
Leandro Carvalho LIMA
Técnico – Norte Energia S.A.

Belo Monte Hydroelectric Plant - PA, reservoir formed by 28 dikes, built on predominantly residual migmatite (migmatito) soils with the presence of filled and unfilled channels.

To determine the hydraulic conductivities of the foundation materials, and to understand the flow in the filled channels, tests were carried out on conventional and larger specimens, with a modified permeameter

The study was developed within the scope of the ANEEL/2022 P&D Project, funded by Norte Energia.

Results...



5 – DW26 Paper

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS



Comitê Brasileiro de Barragens
I Simpósio sobre Solos Residuais Tropicais em Barragens
Tema SR.1
Belém – PA, 23 de setembro de 2026

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE SOLOS DE ALTERAÇÃO DE FILITO DOLOMÍTICO PRESENTES NA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM

Guilherme Henrique da Silva PINTO
Engenheiro Geotécnico - Pimenta de Ávila

André de Oliveira FARIA
Engenheiro Geotécnico - Pimenta de Ávila

Aryane Silva CARVALHO
Engenheira Geotécnica - Pimenta de Ávila

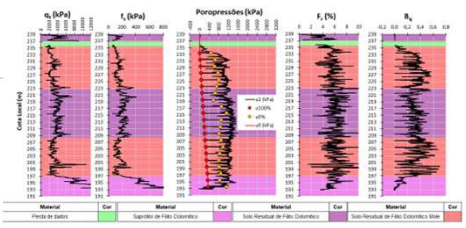
Caio Felipe Barbosa LACERDA
Engenheiro Geotécnico - Pimenta de Ávila

Vanessa Luiza THUMS

To characterize the geomechanical behavior of soils resulting from the alteration of the Dolomitic Phyllite rock mass (maciço rochoso de Filito Dolomítico) at the foundation of a tailings dam, considering the following conditions: i) saprolite; ii) residual soil; and iii) soft residual soil.

The authors used data from field tests (CPTu with pore pressure dissipation) and laboratory tests (characterization and triaxial tests).

Results..



5 – DW26 Paper

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

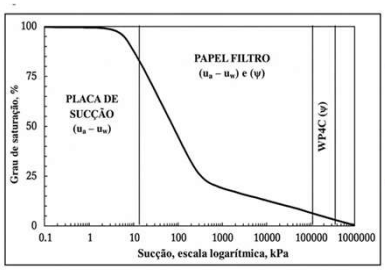

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS
TEMA SR.1
BELÉM – PA, 23 DE SETEMBRO DE 2026

ENSAIOS LABORATORIAIS PARA DETERMINAÇÃO DE UMA CURVA CARACTERÍSTICA COMPLETA DE UM SOLO TROPICAL BRASILEIRO

Fernando CAROLINO DA SILVA
Engenheiro Geotécnico Sênior - The Mosaic Company

Analyze the application of data obtained by three methodologies for determining the water retention characteristic curve (suction plate, filter paper, and WP4C), evaluating the shape of the resulting curves and their correlation with the macro- and microporosity of the studied soil.

Resultados...



5 – DW26 Paper

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

Lecture

Use of geophysical sections for the location of DHPs (Deep Hole Particle Positioning) at the N4E mine, Carajás – PA

Fábio Horta (Vale)



REFERENCES

BERBERIAN, D. *Engenharia de Fundações: Passo-a-Passo.* 2. ed. Brasília: Infrasolo, 2015.

CAMAPUM DE CARVALHO, J., GITIRANA Jr., G.F.N., MACHADO, S.L., MASCARENHA, M.M.A., SILVA FILHO, F.C (organizadores). Solos não saturados no contexto geotécnico. ABMS, 2015.

CHARMAN, J. H. Laterite in road pavements. In Construction Industry and Information Association (CIRIA, 1988).

ELETRONORTE. Memoria Técnica UHE Tucuruí. Tucuruí,1989.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Tropical Residual Soils as Dam Foundation and Fill Material. Paris: ICOLD Committee on Tropical Residual Soils, Bulletin 209, June 2025.

NORTE ENERGIA. Predictive Model For Canaliculi Evolution, Development of a Methodology And Software To Mitigate Impacts On Dam Foundations Literature Review. Brasil, 2022.

RODRIGUES, R.L; FERNANDES D.O; LIMBERGER, A.E.; OLIVEIRA, P.C; Carvalho LIMA, L. C. Influência De Canalículos na Condutividade Hidráulica da Fundação de Barragem - Dique 11 – Belo Monte. I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS, Belém-PA, 2026.

VILHENA, R.M. Ocorrência de canalículos e seus impactos na segurança de barragem. Artigo Científico apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens para Usos Múltiplos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental; Escola Politécnica; UFBA, 2024.

VILLIBOR, D. F., Nogami, J. S. Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso dos Solos Finos, 2009.

VAZ, L. F. Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. Solos e Rochas (Revista Brasileira de Geotecnia), São Paulo, v. 19, n. 2, p. 117-136, ago. 1996



Thank you!

+55 (94) 981353001
gouveia@ufpa.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 SR.1
BELÉM – PA, 24 DE SETEMBRO DE 2026

A VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO GEOFÍSICO (GROUND PENETRATING RADAR GPR) EM BARRAGENS DE TERRA: ESTUDO DE CASO NA BARRAGEM DE SANTA CRUZ DO TRAIRI

Júlia Mairla SANTOS HERCULANO
Mestranda – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Osvaldo DE FREITAS NETO
Professor Doutor - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Francisco PINHEIRO LIMA FILHO
Professor Doutor - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Washington LUIZ EVANGELISTA TEIXEIRA
Doutor - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Joedson Daniel DE ARAÚJO FRANCO
Mestrando - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

RESUMO

Barragens de concepção antiga, especialmente as construídas nas décadas de 1950 a 1980, frequentemente carecem de documentação técnica completa, como registros detalhados de projeto, construção e manutenção. A ausência de informações gera incerteza quanto ao comportamento estrutural e operacional ao longo do tempo, tornando essas obras mais vulneráveis a problemas que podem evoluir em acidente, incidente ou desastre. A Geofísica dispõe de métodos consolidados de investigação não destrutiva, não invasiva e de baixo custo. Para fundamentar essas afirmações, foram realizadas aquisições geofísicas de Radar de Penetração no Solo (*Ground Penetrating Radar* – GPR), utilizando antena de 200 MHz de frequência central, na barragem de terra que apresenta histórico de rompimento estrutural, o Açude Público Santa Cruz do Trairi, localizado no município de Santa Cruz, Rio Grande do Norte, Brasil. A investigação compreendeu na aquisição de 13 (treze) perfis GPR, subdivididos em 43 (quarenta e três) segmentos distribuídos a montante, a jusante e na crista da barragem, além de 10 (dez) segmentos no talude de jusante e 8 (oito) perfis transversais nesse mesmo talude, incluindo um perfil posicionado na base (perfil 9). Os perfis foram integrados a informações georreferenciadas e aerofogramétricas. Os resultados do GPR permitiram a obtenção de dados em grande extensão, sem interferir na estabilidade ou exigir intervenções físicas, demonstrando viabilidade parcial, especialmente na identificação de zonas homogêneas, como as camadas argilosas compactadas, que apresentaram respostas contínuas e coerentes nos perfis.

ABSTRACT

Old-concept dams, especially those built between the 1950s and 1980s, often lack complete technical documentation, such as detailed records of design, construction, and maintenance. The absence of this information creates uncertainty regarding the structural and operational behavior over time, making these structures more vulnerable to issues that may evolve into accidents, incidents, or disasters. Geophysics offers well-established methods of non-destructive, non-invasive, and low-cost investigation. To support these statements, geophysical surveys using Ground Penetrating Radar (GPR) with a 200 MHz central frequency antenna were conducted on an earthen dam with a history of structural failure — the Santa Cruz do Trairi Public Dam, located in the municipality of Santa Cruz, Rio Grande do Norte, Brazil. The investigation involved the acquisition of thirteen (13) GPR profiles, subdivided into forty-three (43) segments distributed upstream, downstream, and along the dam crest, in addition to ten (10) segments on the downstream slope and eight (8) transversal profiles along the same slope, including one profile positioned at the base (profile 9). The profiles were integrated with georeferenced and aerial photogrammetric information. The GPR results provided extensive data without interfering with stability or requiring physical interventions, demonstrating partial feasibility, particularly in identifying homogeneous zones such as compacted clay layers, which exhibited continuous and coherent responses across the profiles.

.

1. INTRODUÇÃO

Desde as primeiras civilizações, o desenvolvimento da humanidade tem se relacionado à capacidade de armazenar e distribuir água. No Brasil, entre as décadas de 1950 a 1980, houve uma "grande aceleração" na engenharia de barragens, principalmente as de terra, promovida pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), como política pública para mitigar os efeitos das secas do Nordeste [1,2].

As barragens constituem estruturas hidráulicas complexas, projetadas para conter de substâncias líquidas (ou mistura de líquidos e sólidos), formando reservatórios de acumulação [3]. Elas representam ativos de elevado valor econômico na infraestrutura nacional, essenciais para segurança hídrica e desenvolvimento regional. Contudo, barragens construídas nas décadas de 1950 a 1980 frequentemente apresentam documentação técnica incompleta ou insuficiente, o que dificulta sua manutenção a longo prazo.

A falta de documentação técnica e registros detalhados, como projetos executivos, diários de campo da construção, especificações de materiais empregados, relatórios de compactação de aterros e históricos sistemáticos de inspeções, constitui um entrave significativo à gestão de riscos e à segurança dessas estruturas [4,5]. Essa lacuna documental gera incertezas sobre o comportamento geotécnico, hidrológico e estrutural ao longo de sua vida útil projetada, comprometendo a prevenção de falhas potenciais, como anomalias ou erosão interna, com potencial para evoluir a incidentes, acidentes ou desastres de impactos econômicos, sociais e ambientais irreparáveis, modificando a condição estável da barragem.

Nesse contexto, métodos geofísicos não destrutivos, como o Radar de Penetração no Solo (GPR), emergem como complementares às abordagens geotécnicas tradicionais. Essa pesquisa avalia a viabilidade do GPR na barragem Santa Cruz do Trairi (RN), reconstruída após ruptura em 1981, por meio de 13 perfis integrados a dados aerofotogramétricos e GNSS-RTK. O objetivo geral é demonstrar a aplicabilidade do GPR em barragens sem documentação completa. Como objetivos específicos, destacam-se: (I) aquisição e processamento de perfis GPR; (II) integração com ortomosaico e GNSS; e (III) interpretação da viabilidade técnica do método.

2. ASSUNTO

2.1 Barragens de Terra e suas Vulnerabilidades

As barragens de terra são estruturas convencionais, classificadas em perfis homogêneos ou zonados, que utilizam solos compactados obtidos localmente. Consideradas do tipo mais elementar de barragem, são recomendadas para vales mais abertos, com fechamento transversal para represamento da água [6,7], localizando-se geralmente em áreas de transição entre regiões de montanha e planícies, no terço médio dos rios. Por empregarem predominantemente solos compactados, constituem construções sustentáveis e econômicas [8].

Essas estruturas são vulneráveis a diversos tipos de problemas estruturais e funcionais que podem evoluir para acidentes, incidentes ou desastres, conforme a gravidade e as consequências associadas. Os órgãos de fiscalização baseiam-se nas suas diretrizes em casos históricos ou em estudos de casos de falhas estruturais, que revelam os modos de colapso das barragens. [9] destaca que 50% dos rompimentos

decorrem de galgamento, associados à ineficiência estrutural e problemas geotécnicos. Contudo, muitos reservatórios carecem de dispositivos adequados, critérios de projetos/construção apropriados, inspeções sistemáticas e gestão eficaz de segurança [10] elevando sua vulnerabilidade operacional.

A avaliação de danos e falhas relacionadas diretamente à verificação da integridade estrutural e operacional, tema amplamente discutido na geotecnia devido às consequências sociais, ambientais, econômicas e hidrológicas [11]. No contexto brasileiro, a revisão da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB - Lei n° 12.334/2010) classifica estruturas por Categoria de Risco (CR) e Dano Potencial Associado (DPA), exigindo inspeções periódicas [12].

Embora os avanços técnicos tenham melhorado a qualidade construtiva, a segurança absoluta permanece inalcançável, com acidentes ainda possíveis [13]. [14] enfatizam que o monitoramento frequente é o meio mais eficaz para avaliar a segurança, comparando condições atuais ao projeto original por meio de documentação e registros [15]. Contudo, métodos instrumentais convencionais (piezômetros, inclinômetros) são limitados em barragens sem documentação detalhada de construção.

2.2 Açude Público De Santa Cruz Do Trairi

O açude público de Santa Cruz do Trairi está localizado no município de Santa Cruz, estado do Rio Grande do Norte, próximo aos municípios de Currais Novos e Tangará e a cerca de 116 km da capital do estado, Natal/RN. De acordo [16] a obra foi construída entre 1957 e 1959 e consiste em uma estrutura de terra homogênea, com finalidade de abastecimento humano.

O reservatório foi construído com finalidade de acumular água, visando atenuar os efeitos das secas que acometiam a região. Contudo, diversas pequenas barragens foram construídas a montante, em afluentes do rio Trairi, destacando-se o Açude Mãe D'água, com capacidade de cerca de 3.000.000 m³, e o Açude Boanerges, com 1.000.000 m³, ambos localizados nas mediações da cidade de Campo Redondo.

A barragem foi reconstruída em 1995 pelo 1º BEC, incorporando as mais modernas características técnicas da época [17]. Um acidente como este evidencia a importância de um planejamento criterioso no aproveitamento dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica, bem como de um adequado controle nas fases do projeto e fiscalização em todas as fases.

No relatório fornecido pelo 1º BEC, registram-se imagens da barragem, conforme representado na Figura 1. A Figura 1a mostra a barragem construída, possivelmente nos anos 1950-1960, com destaque no enrocamento de pedras e estruturas homogênea típica, ao lado o leito do rio Trairi. A Figura 1b, mais recente e datada de 2025, apresenta a barragem em operação, com a crista e vegetação mais consolidada e presente.

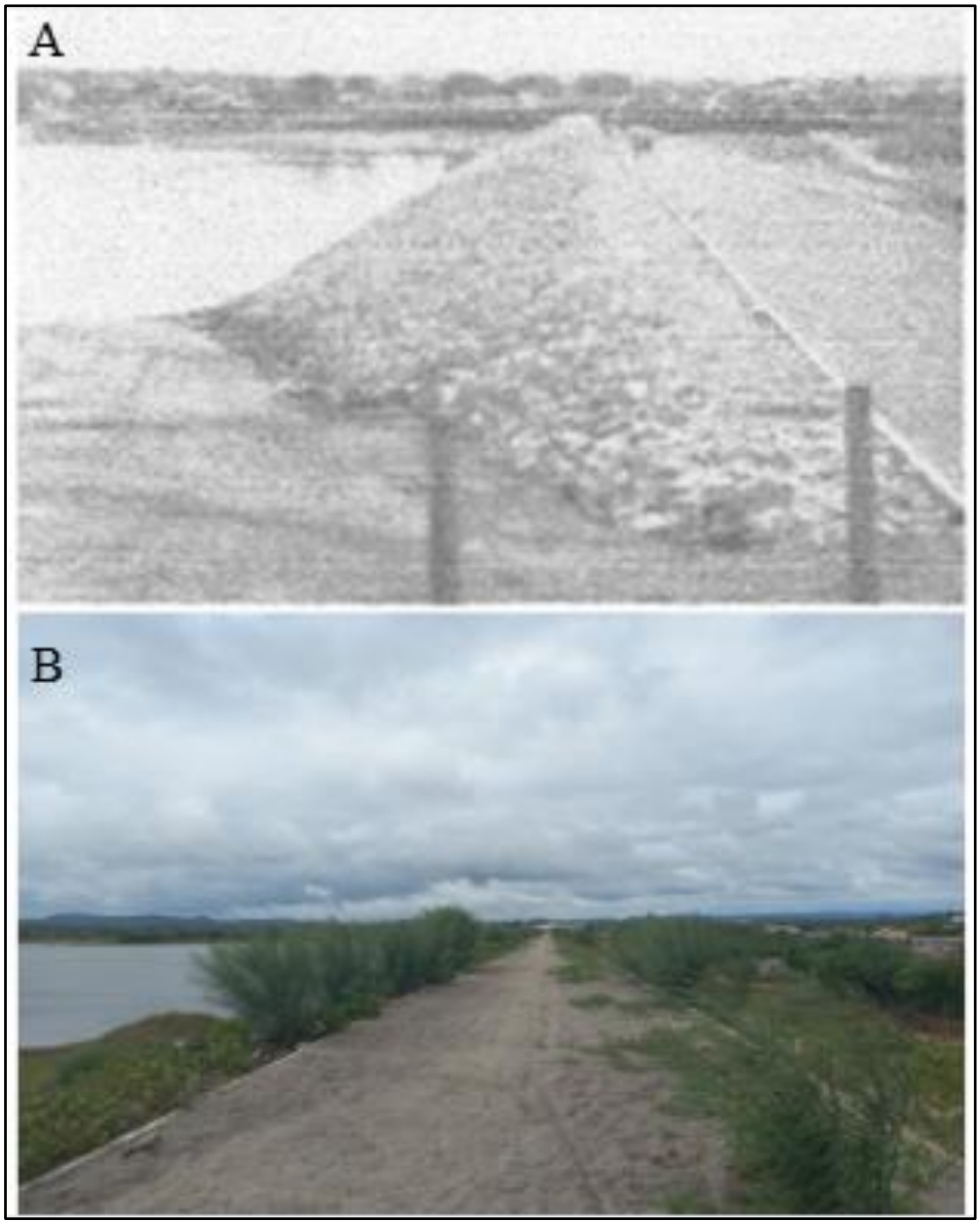


Figura 1 - Barragem de Santa Cruz do Trairi construída: (a) original dos arquivos BEC e (b) mais recente, datada de 2025.

A área de estudo é representada por um ortomosaico que evidencia a distribuição espacial, conforme ilustrado na Figura 2.

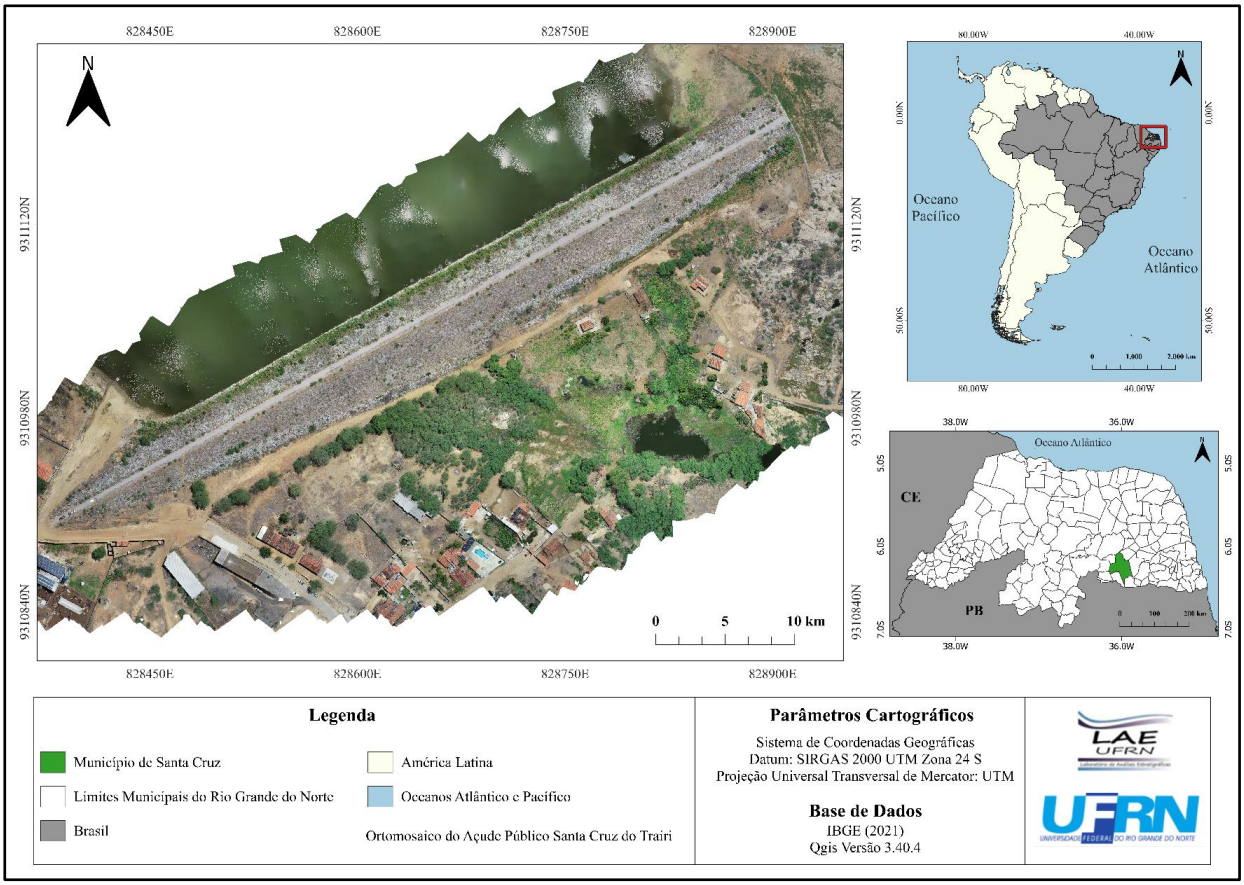


Figura 2- Mapa de localização do Açude Público Santa Cruz do Trairi.

3 AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

3.1 Aquisição

3.1.1 Georadar

As aquisições foram realizadas utilizando o sistema GPR SIR-3000 da *Geophysical Survey Systems, Inc.* (GSSI), pertencente ao Laboratório de Análises Estratigráficas (LAE) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), com antena blindada de 200 MHz de frequência central, em modo contínuo por distância e por perfilagem de reflexão. Configurou-se uma janela temporal de 250 ns, com amostragens espaciais de 50 traços por metro e taxa de amostragem de 1.024 amostras por traço.

O sistema utilizado segue o modelo clássico de GPR, composto por uma unidade de controle, odômetros, baterias, antena blindada de 200 MHz, cabos e conexões. O SIR-3000 integra em um único gabinete os módulos de visualização e configuração, nessa configuração o sistema é montado sobre uma unidade de transporte (suporte de arrasto) com odômetro incorporado.

Durante o período de Agosto de 2025, realizou-se a primeira aquisição, compreendendo 7 segmentos longitudinais (orientadas a montante – Perfil 1) e 8 perfis transversais no talude a jusante da barragem, sendo um perfil posicionado na base do talude. Posteriormente, em novembro de 2025, procedeu-se à segunda aquisição, totalizando 4 perfis divididos em 28 segmentos: 2 perfis longitudinais (18 segmentos- Perfis 2 e 3) e 2 perfis na base da barragem (10 segmentos - Perfis 4 e 5). As tabelas 1 e 2 apresenta a distribuição dos perfis longitudinais e transversais adquiridos, respectivamente.

Tabela 1: Nomenclatura, segmentos, comprimento (m), sentido e descrição da localização dos perfis GPR longitudinais adquiridos.

	Perfis Longitudinais			
Nomenclatura	**Quantidades de Segmentos**	**Comprimento total (m)**	**Sentido**	**Descrição**
Perfil 1	7	619,92	SW-NE	Orientados a montante
Perfil 2	9	596,65	SW-NE	Orientados a jusante
Perfil 3	9	593,65	SW-NE	Orientados no centro
Perfil 4	5	410,50	SW-NE	Orientados na base da barragem
Perfil 5	5	410,00	SW-NE	Orientados na base da barragem

Tabela 2: Nomenclatura, segmentos, comprimento (m), sentido e descrição da localização dos perfis GPR transversais adquiridos.

Perfis Transversais			
Nomenclatura	**Comprimento (m)**	**Sentido**	**Descrição**
Perfil 1	13,19	SE-NW	Jusante
Perfil 2	12,63	SE-NW	Sobre o trilho
Perfil 3	15,00	SE-NW	Jusante
Perfil 4	11,62	SE-NW	Jusante
Perfil 5	13,08	SE-NW	Jusante
Perfil 6	15,44	SE-NW	Jusante
Perfil 7	8,79	SE-NW	Jusante
Perfil 8	9,73	SE-NW	Jusante

No total, foram adquiridos 5 perfis longitudinais e 8 perfis transversais, conforme apresentado na Figura 3.

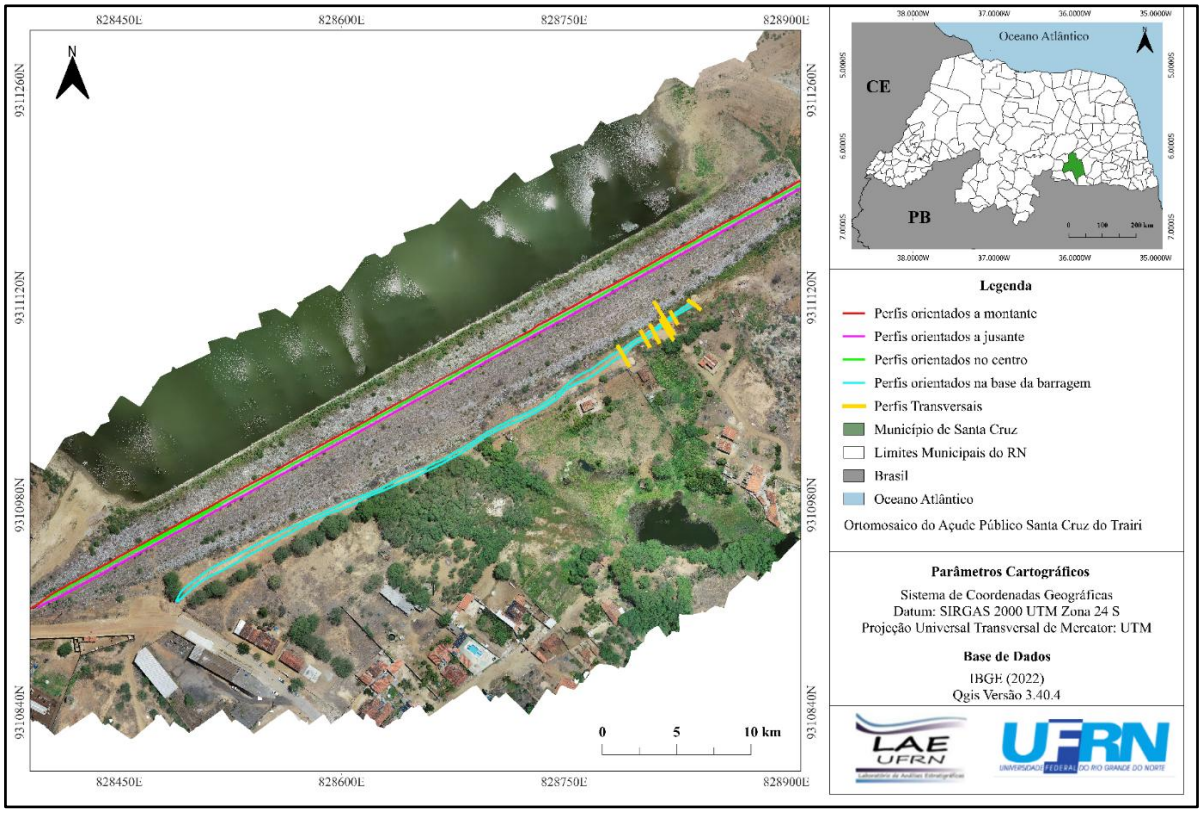


Figura 3 - Mapa de localização do açude público de Santa Cruz do Trairi.

3.3 Interpretações e Resultados

3.3.1 Aerofotogrametria

A Figura 4, elaborada no *Agisoft Metashape Pro*™ e importada no software *MOVE* ™. (versão acadêmica 2024.1, *Petroleum Experts*), apresenta o modelo digital 3D georreferenciado da barragem, constituindo um dos resultados do processamento aerofotogramétrico. Esse modelo possibilita a visualização detalhada de toda extensão do talude de jusante abrangendo a ombreira direita até a ombreira esquerda. Além disso, o modelo é fundamental para a análise geométrica da estrutura e para a correlação com os perfis GPR, permitindo a integração entre os dados topográficos e geofísicos.



Figura 4: Modelo virtual 3D construído no software *MOVE* ™.

A distribuição espacial dos segmentos GPR ao longo da barragem (Figura 5), permite visualizar a orientação, extensão e posicionamento em relação à geometria do maciço. Essa representação em planta contextualiza a aquisição dos perfis geofísicos, evidenciando a área efetivamente investigada e a organização espacial dos segmentos ao longo da estrutura.

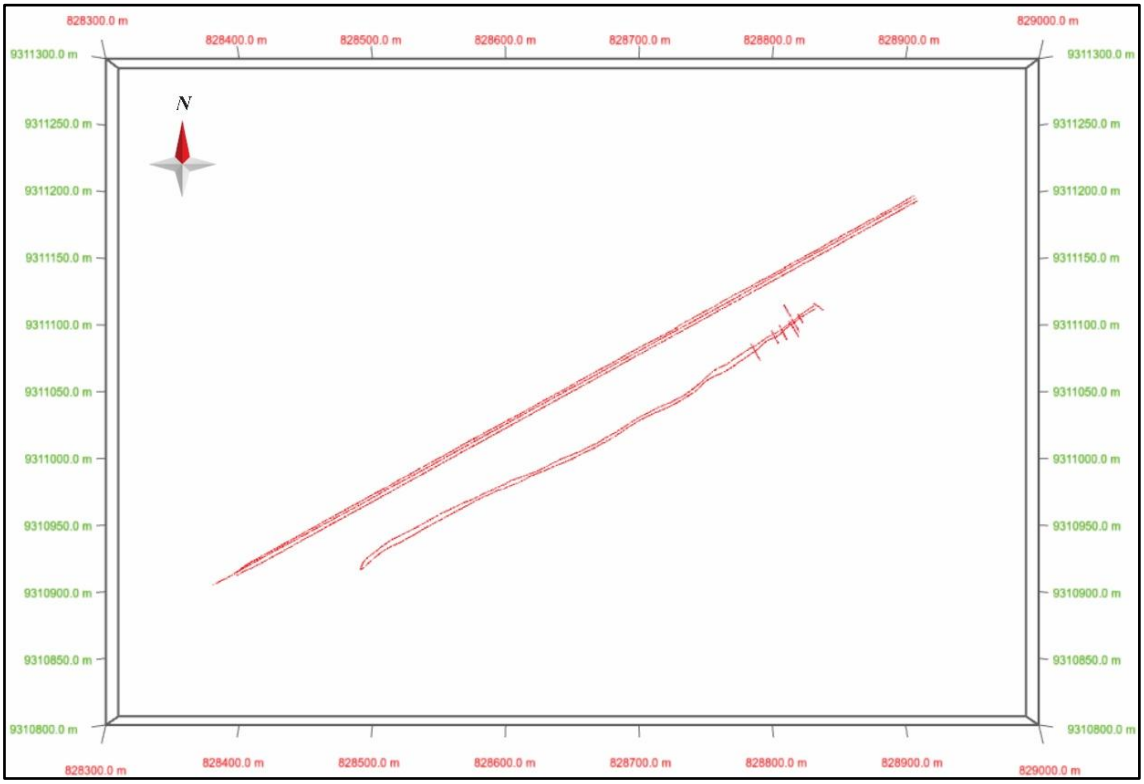


Figura 5: Distribuição espacial dos segmentos GPR na área de estudo.

A Figura 6 corresponde a um Modelo Digital de Superfície (MDS) tridimensional da barragem, construído no software *Petrel* ™ a partir da nuvem densa de pontos. O modelo exibe a superfície topográfica e inclui não apenas as elevações do terreno, mas também os elementos situados acima dele, como edificações e cobertura vegetal [18], permitindo a análise das variações altimétricas por meio de uma escala de cores graduada.

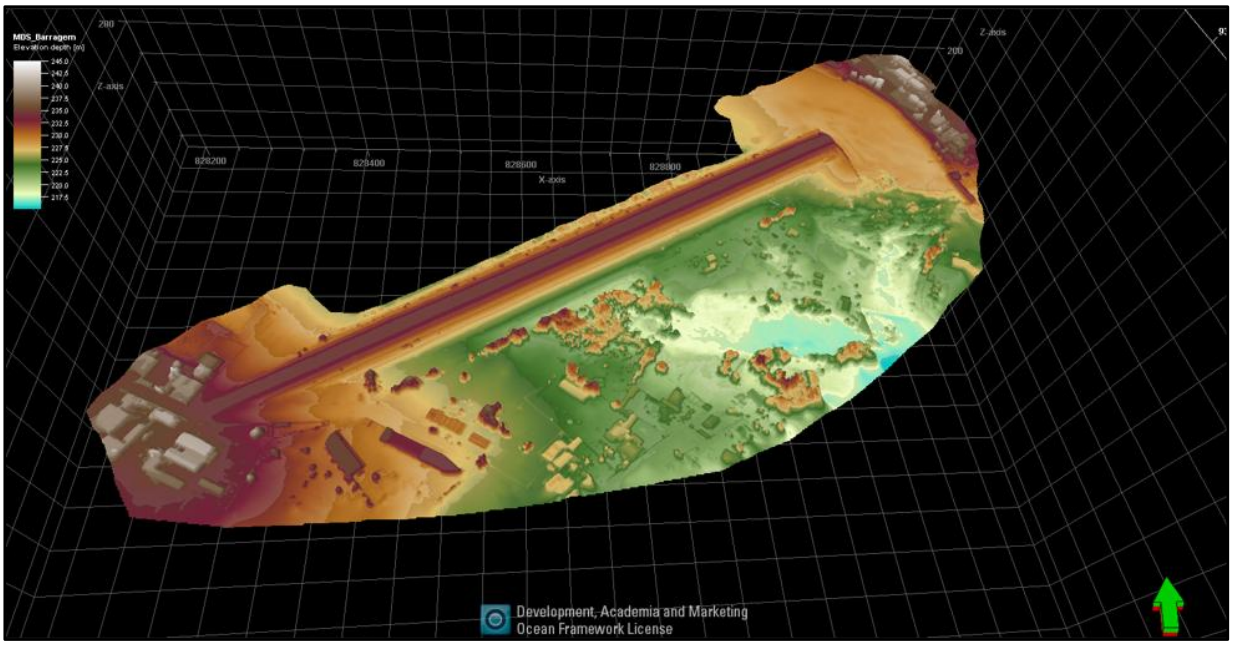


Figura 6: Modelo digital de superfície construído no software *Petrel* ™.

No modelo, a barragem destaca-se como uma feição linear com cotas elevadas em relação às áreas adjacentes. A distribuição altimétrica é representada por uma escala contínua de cores, na qual os tons quentes, vermelho a laranja, indicam as maiores elevações, enquanto os tons mais frios, entre verde a azul, representam regiões de menores elevações. Essa gradação facilita a identificação do coroamento, do talude de jusante, das áreas com vegetação densa, das estruturas construídas e zonas de acumulação de sedimentos, além de evidenciar padrões de declividade ao longo da barragem.

3.3.2 Georadar

O planejamento das aquisições dos dados considerou o compromisso entre resolução vertical e profundidade de investigação, parâmetros fundamentais na aplicação do método GPR. Antenas de menor frequência apresentam maior capacidade de propagação no meio, permitindo investigações mais profundas, embora com redução da resolução quando comparadas às antenas de maior frequência. Neste estudo, a qualidade geral do sinal dos dados de GPR com antena de 200 MHz foi satisfatória, permitindo o imageamento até a profundidade máxima de 3 m para perfis longitudinais e 4 m para perfis transversais.

A definição da profundidade máxima relaciona-se à atenuação do sinal eletromagnético decorrete da dissipação da energia do pulso ao percorrer o maciço. Dessa forma, o registro da profundidade máxima em cada radargrama estabelece uma margem segura para a interpretação geométrica, garatindo que as feições analisadas estejam compreendidas dentro da zona de resposta efetiva do sistema.

O processo de construção e reconstrução do açude Santa Cruz do Trairi envolveu a deposição de materiais em camadas horizontais sucessivas, seguidas por processos de compactação com areias e pedregulhos, conforme detalhado na planta do reprojetamento. A análise dos perfis iniciou-se com a determinação das velocidades a partir das semi-hipérboles observadas nos radargramas. Essa etapa possibilitou estimar a propagação das ondas eletromagnéticas no meio e, consequentemente, realizar a conversão tempo-profundidade com confiabilidade.

3.3.2.1 – Zonas Argilosas

Os resultados confirmam que o maciço apresenta características físicas típicas de barragens de terra, compostas majoritariamente por solos argilosos. A resposta eletromagnética registrada ao longo dos segmentos, associada ao contraste dielétrico entre camadas adjacentes e à continuidade das reflexões, foi fundamental para a identificação das feições interpretadas e caracterização do meio. A integração entre a análise de velocidades, a inferência das constantes dielétricas e a adoção de uma velocidade média permitiu gerar radargramas consistentes, conforme ilustrado na Figura 7. A Figura 7a (Segmento 5), 7b (Segmento 6) e 7c (Segmento 7) do perfil 1 evidenciam a presença de zonas argilosas no interior do maciço, caracterizadas pela continuidade das reflexões observadas nos radargramas obtidos na região do coroamento.

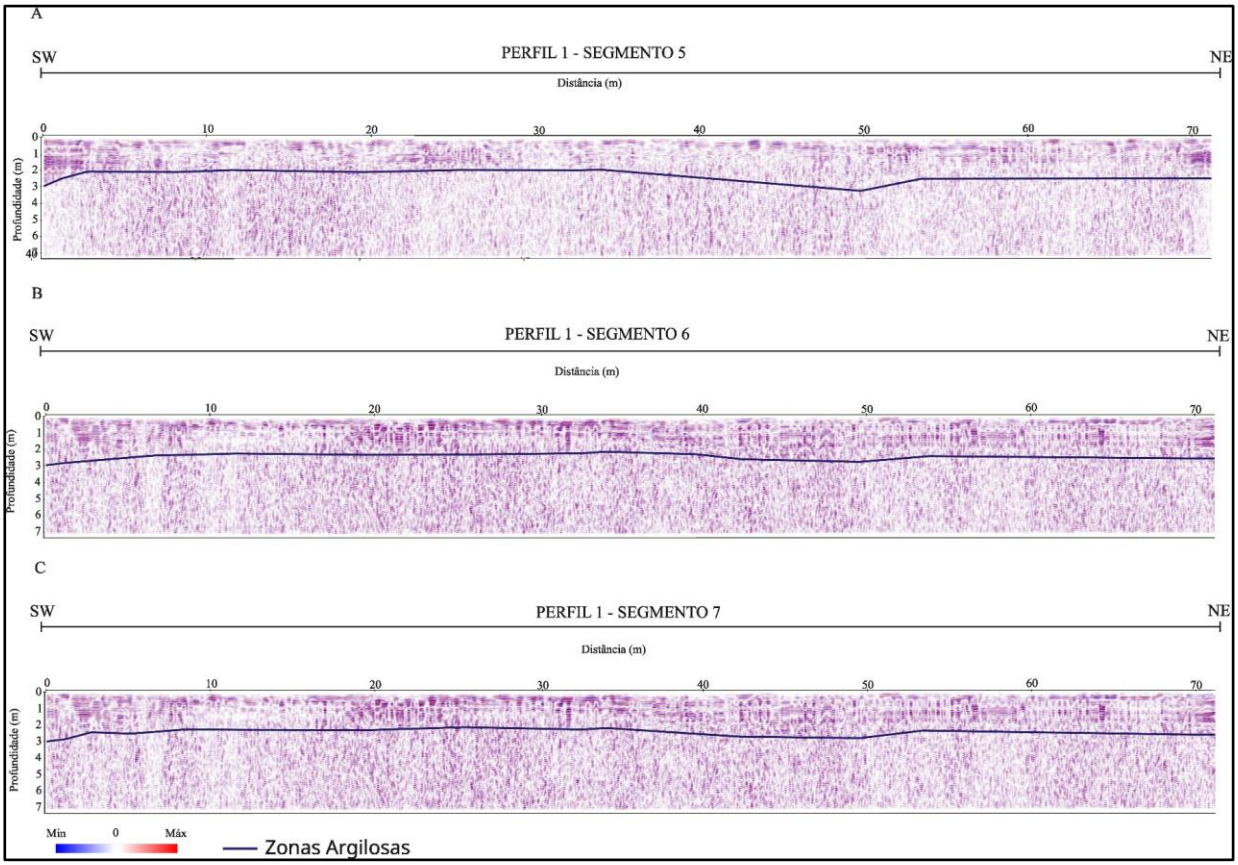


Figura 7: Perfis GPR: (a) Segmento 5, (b) Segmento 6 e (c) Segmento 7 do Perfil 1, evidenciando zonas argilosas no maciço da barragem.

A análise visual dos radargramas revela uma assinatura eletromagnética condizente com o processo construtivo de barragens de terra, no qual a compactação mecânica em camadas sucessivas gera contrastes dielétriocos periódicos nas interfaces dos materiais (areias e argilas). Essa interpretação foi viabilizada pelo processamento dos sinais e pela calibração das velocidades de propagação, permitindo uma correlação precisa entre os dados geofísicos e o projeto construtivo da barragem.
É importante destacar que as camadas argilosas apresentaram assinaturas consistentes em todos os perfis longitudinais, tanto no coroamento quanto na base da barragem. A estabilidade dessas repostas em profundidade indica uma homogeneidade na deposição e compactação do solo, reforçcando a integridade estrutural do maciço. Adicionalmente, as zonas interpretadas como argilosas, representadas pelas linhas de interpretação, apresentam uma atenuação característica do sinal, decorrentes da condutividade inerente a esse tipo de solo, enquanto a continuidade atesta a compactação realizada.

2.3.2.2 – Zonas de fraturamento

A análise dos segmentos dos perfis 4 e 5, adquiridos na base do talude de jusante permitiu a identificação de um padrão recorrente de zonas de fraturamento no substrato. Conforme ilustrado na Figura 8, o radargrama original, apresentado com menor saturação (Figura 8a). A representação interpretada (Figura 8b) destaca, por meio das linhas amarelas, essas feições identificadas no radargrama. Ressalta-se que a Figura 24b apresenta uma saturação mais acentuada, decorrente das configurações de visualização aplicadas no software *MOVE* ™.

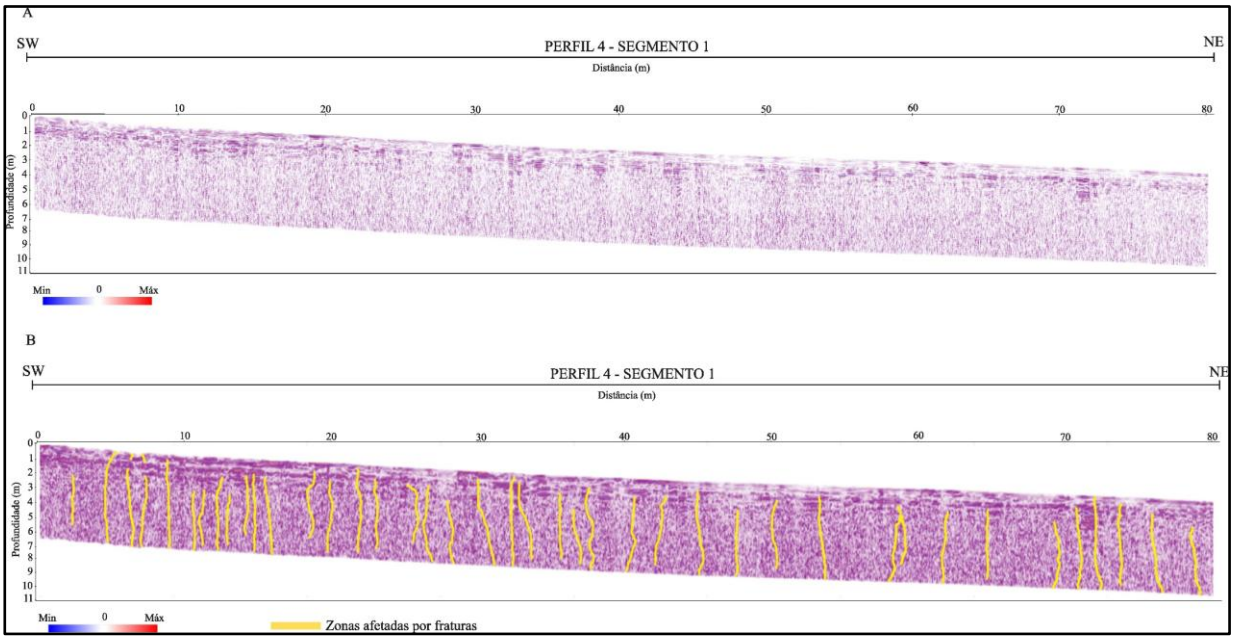


Figura 8: Zonas de fraturamento no substrato: (a) radargrama original (b) feições identificadas.

As fraturas identificadas caracterizam uma zona de fraqueza estrutural significativa. Do ponto de vista da segurança de barragens, tais descontinuidades são fundamentais para a análise de estabilidade, uma vez que estas feições atuam como caminhos preferenciais para circulação de fluidos no interior do maciço. Esse regime de percolação facilitada constitui um dos principais fatores de risco, pois pode comprometer a integridade e estabilidade do interior do maciço [19].

Essa configuração estrutural reflete as fragilidades tectônicas regionais da Província Borborema, frequentemente associadas a zonas de falhamentos transcorrentes que controlam a drenagem local e podem influenciar o comportamento hidrológico tanto na fundação quanto no maciço. A Figura 9 apresenta o mapeamento dos lineamentos estruturais interpretados na área de estudo. A Figura 9a sintetiza a distribuição espacial dos lineamentos estruturais sobre o modelo tridimensional da barragem, evidenciando o padrão estrutural interpretados. Na Figura 9b, destaca-se a concentração dos lineamentos de forma isolada e suas orientações preferenciais, com maior ocorrência dos *trends* estruturais nas direções NW-SE e NE-SW.

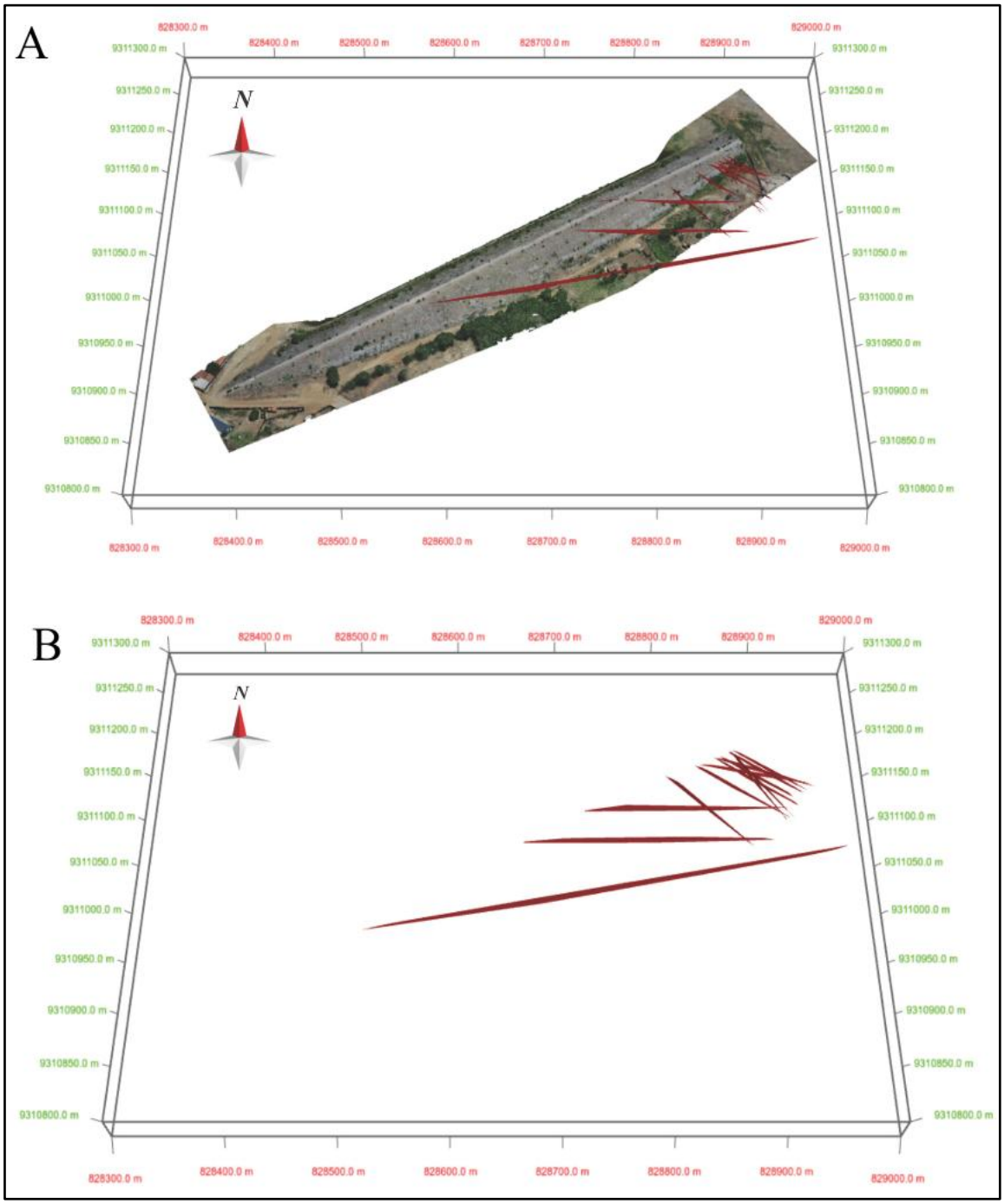


Figura 9: Mapeamento dos lineamentos estruturais: (a) distribuição dos lineamentos sobre o modelo tridimensional e (b) distribuição espacial dos lineamentos.

Essa representação tridimensional permite visualizar a continuidade lateral das descontinuidades, indo além da interpretação bidimensional convencional. A predominância de feições orientadas com direções oblíquas evidencia o forte controle tectônico exercido sobre o maciço rochoso e sobre os contatos litológicos região. Essas fissuras ou vazios criam caminhos preferenciais para o fluxo de água, suscetíveis a processos erosivos [20], com implicações diretas sobre a circulação de água, a permeabilidade e a estabilidade geotécnica da barragem. O Gráfico 1 apresenta o mapeamento dos lineamentos estruturais interpretados, bem como sua representação em planta e distribuição espacial



Gráfico 1: Distribuição espacial e orientação dos lineamentos estruturais da região.

Essas orientações são particularmente relevantes para caracterização geológico-geotécnica, confirmando a anisotropia estrutural da área e reforçando a interpretação de que o maciço foi condicionado por um sistema de lineamentos preferenciais. Tais direções funcionam como zonas de fraqueza que favorecem a percolação de água no maciço. A Figura 10 complementa essa análise ao apresentar o diagrama de roseta das orientações dos lineamentos estruturais mapeados, permitindo sintetizar as direções predominantes, com concentração das medidas em regiões específicas e destaque para as orientações.

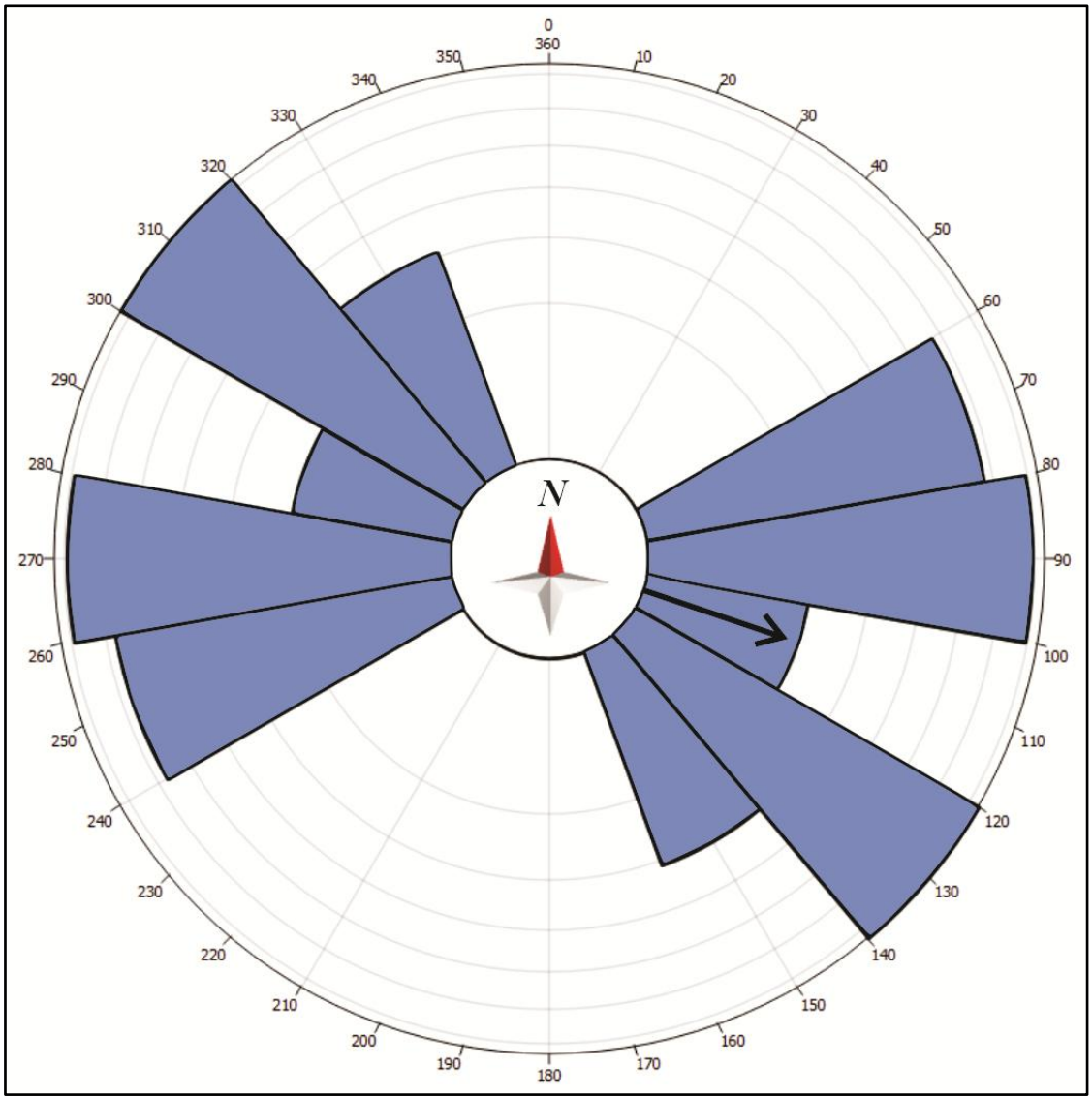


Figura 10: Diagrama de roseta das orientações dos lineamentos estruturais.

Esta representação estatística sintetiza nas direções NW-SE (aproximadamente 300°-320°) e NE-SW (aproximadamente 80°-140°). A predominância destas orientações é consistente com o regime tectônico da região, reforçando a interpretação de que o maciço foi condicionado por sistemas de falhamentos transcorrentes que controlam a estrutura e a drenagem local. Do ponto de vista geotécnico, a confirmação desta anisotropia estrutural indica que a permeabilidade e estabilidade do maciço estão sob controle direto de descontinuidades com direções preferenciais, que devem ser consideradas como potenciais zonas de fraqueza na análise de segurança da barragem.

3. CONCLUSÕES

A interpretação dos radargramas obtidos neste trabalho proporcionou a compreensão da organização interna do maciço da barragem Santa Cruz do Trairi. A resposta eletromagnética observada, embora influenciada por fatores como a atenuação do sinal e o contraste dielétrico entre materiais adjacentes, viabilizou a inferência indireta da estrutura interna do maciço, mesmo diante da ausência de registros documentais técnicos. Os resultados indicam um comportamento eletromagnético relativamente uniforme ao longo dos segmentos analisados, caracterizado pela homogeneidade das camadas de argilas compactadas.

Apesar das limitações inerentes ao método, o GPR demonstrou uma viabilidade técnica parcial, sobretudo na identificação de zonas de homogeneidade, consolidando-se como uma ferramenta de investigação não destrutiva de eficiência operacional [21]. Sua capacidade de imageamento contínuo em grandes extensões do maciço contribui diretamente para a segurança preventiva e operacional, permitindo a investigação em grandes porções do interior da estrutura [22,23,24]. Além da caracterização das camadas argilosas, a identificação de descontinuidades estruturais e zonas de fraturamento na base do talude de jusante revelou a existência de caminhos preferenciais para percolação de fluidos, tais evidências representam, portanto, potenciais focos de erosão interna (*piping*) que demandam atenção na gestão de risco da barragem.

No caso da barragem de Santa Cruz do Trairi, a aquisição possibilitou o mapeamento de uma extensa área sem a necessidade de intervenções físicas ou riscos à estabilidade do maciço. Ademais, a viabilização da integração com dados georreferenciados e aerofogramétricos, ampliou a precisão da análise espacial. Em conjunto, esses resultados reforçam o potencial do método no contexto de barragens que carecem de documentação construtiva detalhada. Simultaneamente, o estudo evidencia a necessidade de integrar técnicas complementares, como eletrorresistividade, sísmica de refração e investigações geotécnicas diretas, para aprimorar o entendimento estrutural do maciço e elevar a confiabilidade das interpretações geofísicas.

6.1 Recomendações de trabalhos posteriores

Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de estudos complementares que aprofundem as discussões levantadas nesta pesquisa. Dentre as propostas para estudos trabalhos futuros, destaca-se a integração metodológica, combinando o GPR com métodos geofísicos como a Eletrorresistividade (ETR), a Sísmica de Refração, Potencial espontâneo e investigações geotécnicas de forma completar o. Esta abordagem visa complementar as respostas dielétricas com variações na condutividade elétrica, nas propriedades elásticas e na dinâmica de fluxo de fluidos no interior do maciço.

Adicionalmente, sugere-se o desenvolvimento de análises de deformação permanente que considerem a influência das zonas de fraturamento mapeadas e o regime de tensões atuantes sobre a estrutura. A combinação destas técnicas, associada a investigações geotécnicas diretas, aprimora o entendimento estrutural do maciço e amplia a confiabilidade das interpretações. A utilização integrada destes métodos apresenta grande potencial para implementação de protocolos sistemáticos

de inspeção e monitoramento de barragens de terra, contribuindo para uma gestão de riscos mais eficiente e segura.

4. PALAVRAS-CHAVE

Barragens antigas; Geofísica; Radar de Penetração no Solo (GPR); Estabilidade estrutural, Investigação não destrutiva.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LOPES, GUILHERME ESTEVES GALVÃO (2019) - Água, energia e estradas: políticas de combate às secas no Ceará nos governos Getúlio Vargas e Juscelino Kubitschek. Revista de História Bilros, v. 15, p. 58–77, Fortaleza.

[2] OLIVEIRA, NATHALIA CAPELLINI CARVALHO DE (2018). A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil. Varia História, v. 34, n. 65, p. 315–346, Belo Horizonte.

[3] ANA. ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. RESOLUÇÃO ANA Nº 121, DE 09 DE MAIO DE 2022. 2022.

[4] AMARO DA SILVA, ROMÁRIO STÉFFANO *et al* (2021). Acidentes e incidentes em barragens brasileiras: uma análise dos dados disponíveis nos relatórios de segurança de barragens e da legislação vigente. Holos, v. 6, p. 1–17, Natal.

[5] SILVA, ELIANE LIMA E.; SILVA, MARIANO ANDRADE DA (2020). Segurança de barragens e os riscos potenciais à saúde pública. Saúde em Debate, v. 44, n. spe2, p. 242–261, Rio de Janeiro.

[6] BARBOSA, RODRIGO DE ANDRADE *et al (*2020). Diagnóstico e execução de ações corretivas em barragem de terra: Estudo de caso da barragem Poleiros em Barra de Santa Rosa-PB. Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, v. 1, n. 51, p. 86–96, João Pessoa.

[7] GAIOTO, NÉLIO (2023). Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento. São Paulo. São Carlos: EESC-USP.

[8] CHOUDHURY, ASHESH; MISHRA, SUDIB KUMAR; GHOSH, PRIYANKA (2025). Seismic demand amplification in earth dam by dynamic dam-reservoir interactions (DRI) under near fault pulse type ground motions. Engineering Geology, v. 344, India.

[9] CARVALHO, DAVID DE (2025). Barragens de terra (livro eletrônico): uma introdução para graduação: um roteiro bibliográfico para estudos: notas de aulas: Fólio Comunicação, Campinas, SP.

[10] ESPÓSITO, TEREZINHA *et al* (2010). Análise por árvore de eventos: ferramenta para gestão de risco em barragens de terra. Geotecnia, n. 120, p. 03–24, Brasil.

[11] VAGNON, FEDERICO; COMINA, CESARE; ARATO, ALESSANDRO (2022). Evaluation of different methods for deriving geotechnical parameters from electric and seismic streamer data. Engineering Geology, v. 303, p. 106670, Italy.

[12] CAMPOS, MARIA ILZE DA SILVA (2020). Uma análise quali-quantitativa das barragens do estado do Pará com dados do Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens (SNISB). Technology Science, v. 2, n. 1, p. 58–61, Anais da 3ª Semana de Engenharia Civil da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará.

[13] PSOMIADIS, EMMANOUIL *et al* (2021). Potential Dam Breach Analysis and Flood Wave Risk Assessment Using HEC-RAS and Remote Sensing Data: A Multicriteria Approach. Water, v. 13, n. 3, p. 364, Greece.

[14] DING, XIAOLI; QIN, HUI (2000). Geotechnical Instruments in Structural Monitoring. Journal of Geospatial Engineering. v. 2, n.2, p.45-56, Hong Kong.

[15] CARVALHO, JANAINA VEIGA; ROMANEL, CELSO (2007). Redes neurais temporais aplicadas ao monitoramento de barragens. Revista Eletrônica de Sistemas de Informação, v. 6, n. 1, Brasil.

[16] SNISB. Informações Básicas - SANTA CRUZ DO TRAIRI. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/barragem/7780/ . Acesso em: 21 set. 2025.

[17] BEC. Histórico do 1° Batalhão de Engenharia de Construção -Batalhão Seridó. p. 1–235, 1995.

[18] SANTOS, AFONSO DE PAULA DOS *et al* (2016). Avaliação da acurácia posicional planimétrica em modelos digitais de superfície com o uso de feições lineares. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 22, n. 1, p. 157–174, Brasil.

[19] DUARTE COSTA, WALTER (2012). Geologia de Barragens. Oficina de Textos ed. São Paulo.

[20] LIN, CHUN-HUN *et al* (2018). Application of geophysical methods in a dam project: Life cycle perspective and Taiwan experience. Journal of Applied Geophysics, v. 158, p. 82–92, China.

[21] BRISTOW, CHARLIE S.; JOL, HARRY M (2003). An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. Geological Society, Special Publications,, v. 211, n. 1, p. 1–7, London.

[22] DE COSTER, A. *et al* (2019). Towards an improvement of GPR-based detection of pipes and leaks in water distribution networks. Journal of Applied Geophysics, v. 162, p. 138–151, Belgium.

[23] GHANBARI, SAJJAD *et al* (2022). An enhanced GPR-based data processing approach for detecting subsurface utilities in urban distribution networks. Journal of Applied Geophysics, v. 207, p. 104831, Iran

[24] LOPERTE, A. *et al* (2011). Ground Penetrating Radar in DamMonitoring: The Test Case of Acerenza (Southern Italy). International Journal of Geophysics, v. 2011, p. 1–9, Italy.

	**Júlia Mairla SANTOS HERCULANO** Bacharel em Geofísica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2023). Atualmente é discente de Mestrado e bolsista pela CAPES do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPCivAm/UFRN) em ênfase na Geotecnia, Geotecnologias e Ambientes Costeiros.
	**Osvaldo DE FREITAS NETO** Atualmente é Professor Efetivo do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal Rio Grande do Norte, onde atua nos cursos de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC-UFRN). Experiência na elaboração de Projetos e prestação de Consultoria e Assessoria Técnica em Engenharia Civil - Geotecnia.
	**Francisco PINHEIRO LIMA FILHO** Possui graduação em Geologia pela Universidade Federal do Ceará (1987), mestrado e doutorado em Geociências (Geologia Sedimentar) pela Universidade de São Paulo (1991). Atualmente, é Professor Titular do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e líder de Grupo de Pesquisa do CNPq (Sistemas Petrolíferos).
	**Washington LUIZ EVANGELISTA TEIXEIRA** Doutor em Geodinâmica e Geofísica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, mestre em Ciência e Engenharia de Petróleo, também pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2008). É graduado em Ciência da Computação (1988) e em Engenharia Civil (1981), pela Universidade Federal do Ceará. Atualmente pesquisa as tecnologias LIDAR e os métodos geofísicos.
	**Joedson Daniel DE ARAÚJO FRANCO** Bacharel em Geofísica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2018), atualmente é Mestrando em Geodinâmica e Geofísica, com ênfase em Geofísica do Petróleo (PPGG/UFRN). Atualmente desenvolve pesquisa voltada no uso do GPR para imageamento e modelagem de estruturas em rochas carbonáticas análogas a reservatórios.

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

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE REJEITO AURÍFERO DE FLOTAÇÃO: DIFERENÇAS ENTRE O ESTUDO DE VIABILIDADE E O PRIMEIRO ANO DE OPERAÇÃO.

Sara Martins NEVES
Engenheira Civil- Brazauro Recursos Minerais

Marisônia Soares dos SANTOS
Geóloga - Brazauro Recursos Minerais

Eduardo LEÃO
Engenheiro Sanitarista - Brazauro Recursos Minerais

Aloysio SALIBA
Eng. Civil, Dr. EEUFMG - Tec3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda.

Lucas Henrique VIEIRA
Engenheiro Civil - Tec3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda.

RESUMO

Este estudo apresenta uma análise comparativa dos dados geotécnicos de rejeitos de flotação obtidos na fase de estudo de viabilidade de um empreendimento de mineração aurífera com os dados coletados após um ano de operação da disposição em reservatório. O objetivo foi identificar variações nas características geotécnicas entre as fases de viabilidade e de operação, fornecendo informações relevantes para a operação e a gestão de segurança da estrutura. Foram comparados os resultados de ensaios laboratoriais das duas fases, incluindo testes de caracterização geotécnica, ensaios reológicos, análises por microscopia eletrônica de varredura e por difração de raios X. Os achados destacam diferenças nos parâmetros geotécnicos que podem subsidiar ajustes operacionais e decisões técnicas, contribuindo para uma melhor compreensão do comportamento de rejeitos de flotação a longo prazo e reforçando a importância do acompanhamento dessas propriedades ao longo do período operacional.

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of geotechnical data on flotation tailings obtained during the feasibility study phase of a gold mine and data collected 1 year after commencement of operations. The objective was to identify the variations in the geotechnical characteristics between the feasibility and operation phases, providing relevant information for the structure's operation and safety management. The results of laboratory tests on the two phases were compared, including geotechnical characterization, rheological, scanning electron microscopy, and X-ray

diffraction analyses. The findings highlight differences in geotechnical parameters that can inform operational adjustments and technical decisions, contributing to a better understanding of the long-term behavior of flotation tailings and reinforcing the importance of monitoring these properties throughout the operational period.

1. INTRODUÇÃO

Grande parte dos rejeitos gerados no processo minerário é armazenada em barragens no Brasil e no mundo. No início de 2025, o Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM) registrava 922 barragens cadastradas em seu banco de dados [1]. Nesse contexto, como principal agente demandante dessas estruturas, o empreendedor minerário deve considerar a gestão de rejeitos desde a fase de implantação do projeto, prevendo estudos detalhados sobre o material a ser gerado e o a ser disposto.

Esses estudos são fundamentais para o adequado dimensionamento e a operação segura da barragem, permitindo avaliar com precisão o comportamento geotécnico e hidráulico dos rejeitos, incluindo parâmetros como resistência, granulometria, tempo de sedimentação e propriedades físico-químicas.

Neste contexto, o presente artigo propõe uma análise comparativa entre os estudos desenvolvidos na fase de viabilidade (*Feasibility Study*) para a implantação e os dados obtidos após o comissionamento e ao longo de um ano de operação, com o objetivo de identificar aspectos não previstos na fase inicial, bem como avaliar a consistência dos parâmetros que se confirmaram ao longo da operação.

A caracterização geotécnica dos rejeitos constitui uma etapa crucial do projeto de estruturas de disposição, dado que propriedades como granulometria, concentração de sólidos, velocidade de sedimentação e densidade influenciam diretamente o dimensionamento, o desempenho operacional e a estabilidade da barragem (ROBINSKY, 1999) [2]

A barragem de rejeitos de flotação, em discussão, foi concebida como a principal estrutura de disposição de rejeitos do empreendimento, projetada para receber aproximadamente 95% dos rejeitos gerados pela planta de processamento ao longo da vida útil da operação, prevista em 10 anos. O estudo preliminar realizado concluiu que os rejeitos são classificados como não perigosos e inertes, não sendo necessária a implantação de sistema de revestimento impermeabilizante, em conformidade com a NBR 13.028 (ABNT, 2025), que apresenta os requisitos para projetos de estruturas destinadas à disposição de rejeitos.

Além de sua função primária de contenção e disposição de rejeitos, a barragem de flotação desempenha papel fundamental no gerenciamento hídrico do empreendimento, atuando também como reservatório de água para atender às demandas operacionais da planta de processamento.

A avaliação técnica preliminar dos rejeitos foi realizada em duas fases: a primeira, entre 2001 e 2017, e a segunda, no final de 2021, para confirmar os resultados. Porém, até o fechamento do estudo de viabilidade, os resultados da segunda fase não

estavam disponíveis, e os da primeira fase foram aplicados ao desenvolvimento do projeto.

2. METODOLOGIA DA PESQUISA

2.1 Classificação dos resíduos sólidos (fase de viabilidade)

A caracterização inicial para o estudo de viabilidade, para a obtenção das propriedades geotécnicas dos rejeitos, foi realizada por meio de ensaios em duas amostras de rejeitos de flotação provenientes do ensaio na planta piloto do projeto, uma em condição de polpa e a outra em condição seca.



Figura 1 – Amostras de rejeitos do ensaio na planta piloto.

Esses ensaios incluíram granulometria por peneiramento e sedimentação, massa específica real dos grãos, adensamento unidimensional e adensamento hidráulico (HCT).

Com o projeto em operação, foram ensaiadas quatro amostras, caracterizadas por granulometria por peneiramento e sedimentação, massa específica real dos grãos, limites de Atterberg, submetidas à análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e à difração de raios X (DRX). Alguns destes ensaios não foram realizados na fase de estudo de viabilidade do projeto, como a caracterização por microscopia eletrônica de varredura, DRX e os limites de Atterberg.

Os rejeitos gerados no processo de beneficiamento devem, obrigatoriamente, ser amostrados, caracterizados e classificados conforme os procedimentos estabelecidos nas normas NBR 10.004 (ABNT, 2024) [3], NBR 10.005 (ABNT, 2004) [4] e NBR 10.006 (ABNT, 2004) [5].com o objetivo de avaliar sua estabilidade química quando em contato com solventes.

Nesse contexto, os rejeitos foram caracterizados e enquadrados em classes, a saber: Classe I (perigosos) e Classe II (não perigosos), sendo esta última subdividida em inertes (Classe II A) e não inertes (Classe II B).

2.2 Caracterização granulométrica

O rejeito coletado foi preparado conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016) [6], caracterizado por meio de granulometria por peneiramento e sedimentação (NBR 7181 - ABNT,

2025) [7], massa específica real dos grãos (NBR 6458 - ABNT, 2025) [8], limites de liquidez (NBR 6459 - ABNT, 2016) [9] e limites de plasticidade (NBR 7180 - ABNT, 2025) [10]. Desses ensaios, obtiveram-se os parâmetros de caracterização apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Caracterização das amostras de rejeitos da planta piloto.

	Rejeito Final Mineralógica - RVN:C	NF5529-VL-2-R19
Argila (%)	10,2	5,1
Silte (%)	32,3	21,6
Areia Fina (%)	49,9	69,3
Areia Média (%)	7,6	4,0
Areia Grossa (%)	0,0	0,0
Pedregulho (%)	0,0	0,0
Massa específica dos grãos (g/cm³)	2,624	2,574

Tabela 2 – Caracterização das amostras de rejeito da fase de operação.

	AM-01 FTSF	AM-03 FTSF	AM-05 FTSF	AM-06 FTSF
Argila (%)	0,31	0,89	0,01	0,86
Silte (%)	28,01	9,76	25,69	43,37
Areia Fina (%)	50,72	40,79	52,9	49,36
Areia Média	20,90	47,87	21,34	6,40
Areia Grossa	0,06	0,69	0,04	0,01
Pedregulho	0,00	0,00	0,02	0,00
Massa específica dos grãos (g/cm³)	2,676	2,642	2,637	2,661
LL (%)	NL	NL	NL	NL
LP (%)	NP	NP	NP	NP
IP (%)	NP	NP	NP	NP

De forma geral, as amostras correspondem a areia siltosa em ambas as fases, com algumas diferenças nos percentuais de argila observados. A massa específica dos grãos mostrou também coerência de valores. Quanto aos limites de Atterberg, os valores não foram determinados na fase de viabilidade.

2.3 Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um instrumento que cria imagens ampliadas, revelando informações em escala microscópica sobre o tamanho, forma, composição, cristalografia e outras propriedades físicas e químicas de uma amostra. O princípio básico de operação do MEV envolve a criação de um feixe finamente focalizado de elétrons energéticos por meio da emissão a partir de uma fonte de elétrons (GOLDSTEIN et al., 2018) [12]. Dessa forma, a análise por MEV possibilita avaliar a morfologia, a textura superficial e a distribuição granulométrica das partículas de rejeito, gerando imagens de alta resolução que permitem observar características relacionadas à forma, microestrutura e organização das partículas.

A Figura 1 apresenta os resultados da MEV aplicada a três amostras de rejeitos testadas na fase de operação. Os resultados indicam grãos de formas variadas, de cúbica a lamelar, com arestas angulosas.

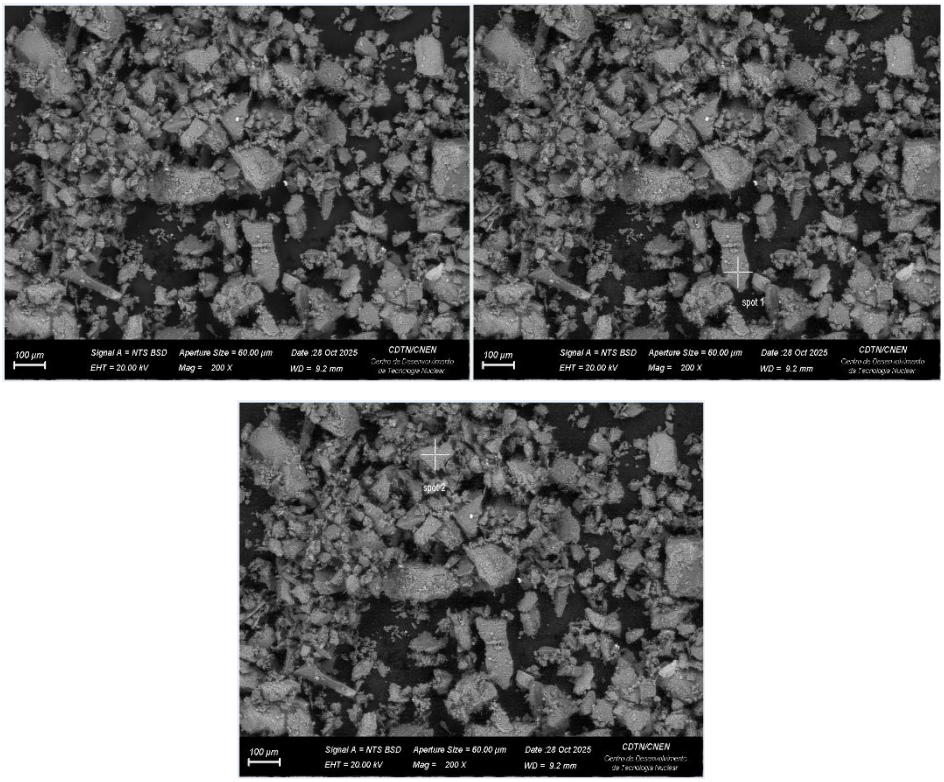


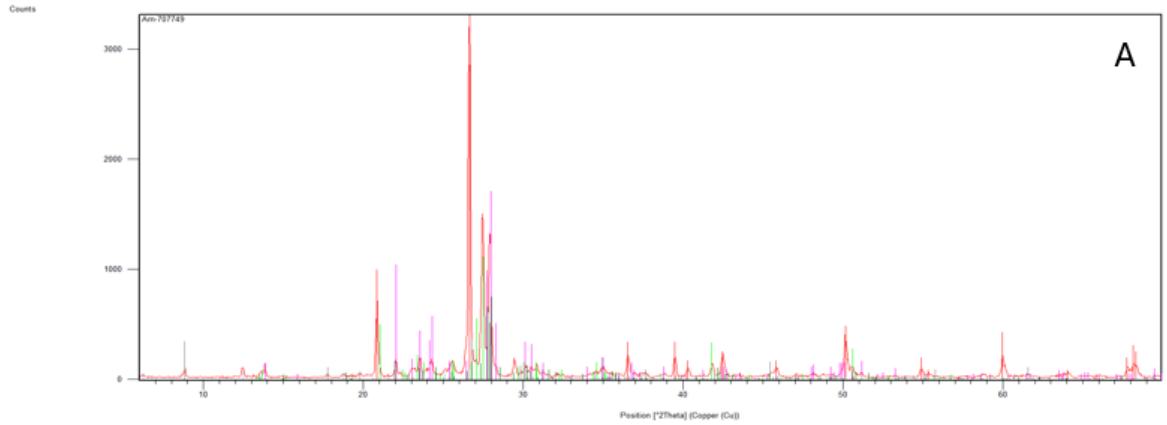
Figura 2 – Amostras de rejeitos da planta piloto.

Observa-se uma distribuição heterogênea entre as partículas com morfologia angular e subangular, com superfícies rugosas e dimensões variando de 6 µm a 220 µm, predominando partículas na faixa do silte à areia fina. As análises dos pontos “spot 1” e “spot 2” indicam partículas com dimensões características de aproximadamente 80 µm e 70 µm, respectivamente. Também foi observada a presença de finos aderidos aos grãos maiores, o que indica elevada fragmentação mecânica e heterogeneidade textural do material analisado.

2.4 Difração de Raios X (DRX)

A difração de raios X (DRX) é uma técnica empregada para analisar a estrutura cristalina dos materiais e identificar suas fases minerais constituintes. Nesse método, um feixe de raios X incide sobre o material e interage com seus planos cristalinos, sendo difratado em diferentes ângulos conforme a organização atômica característica de cada mineral. Cada fase cristalina gera um padrão específico de picos no difratograma, atuando como uma assinatura mineralógica própria. A identificação das fases presentes é realizada por meio da comparação desses padrões com bancos de dados cristalográficos [11].

A Figura 3 apresenta o difratograma da amostra e os minerais identificados no ensaio.



B

File: AM - 107749

No.	Visible	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Crystal System	%
1	☑	00-005-0490	Quartz, low	Si O2	Hexagonal	49,28
2	☑	00-020-0554	Albite, ordered	Na Al Si3 O8	Anorthic	21,28
3	☑	00-019-0932	Microcline, intermediate	K Al Si3 O8	Anorthic	18,24
4	☑	00-006-0263	Muscovite-2\ITM#1\RG	K Al2 (Si3 Al) O10 (O H , F)2	Monoclinic	2,02
5	☑	00-029-0854	Clinochlore-\IT2M#I#Ib\RG	Mg5 Al (Si3 Al) O10 (O H)8	Monoclinic	2,53
6	☑	00-003-0800	Hematite	Fe2 O3	Rhombohedral	1,71
7	☑	00-041-1486	Anorthite, ordered	Ca Al2 Si2 O8	Anorthic	4,94
					Total:	100,00

Figura 3 – A: Difratograma. B: Minerais da amostra.

Na Figura 2, observa-se predominância de quartzo, o que corrobora os dados observados no MEV. A presença de quartzo pode gerar partículas angulares após os processos de britagem e moagem. A heterogeneidade granulométrica observada também está associada à diversidade mineralógica identificada pelo DRX.

Essa maior concentração de quartzo pode estar associada a características arenosas identificadas na caracterização e à baixa plasticidade; esta última pode estar relacionada com a baixa composição de argilominerais, como muscovita (2,02%) e clorita (2,53%).

2.5 Sedimentação por coluna

Para o dimensionamento da velocidade de sedimentação da polpa, realizou-se um ensaio em coluna com concentração de sólidos de 32%, a partir do qual foi possível

determinar a taxa de deposição das partículas em suspensão. Não se utilizou defloculante no ensaio.



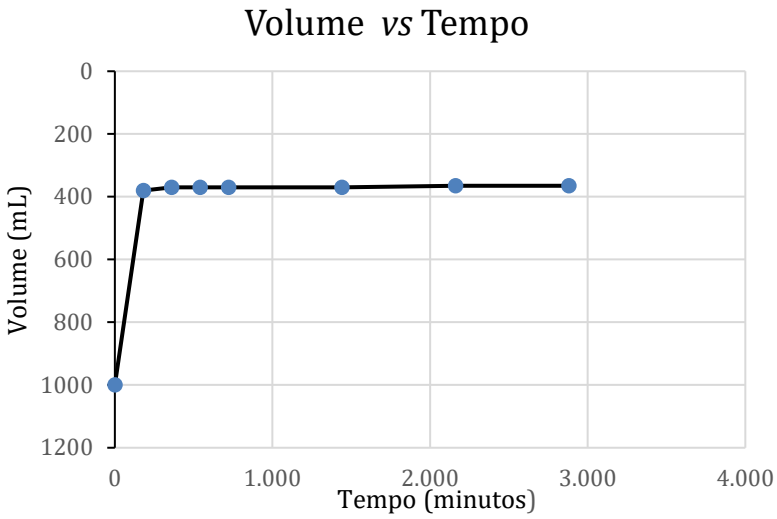


Figura 4 – Ensaio de decantação.

Nesse sentido, o tempo de estabilização da polpa foi de aproximadamente três horas, indicando o período necessário à clarificação da água sobrenadante, tornando-a rapidamente disponível para recirculação e reutilização no processo da planta. Observa-se, no entanto, turbidez na água após o período completo do ensaio, provavelmente associada às partículas argilosas. Ao final do ensaio, a massa específica aparente da polpa decantada foi de 1,09 g/cm³.

3. CONCLUSÕES

O relatório de viabilidade indica que o rejeito proveniente do processo de flotação seria predominantemente arenoso, mas isso deveria ser confirmado após a operação da barragem, utilizando os rejeitos gerados pela planta, o que proporcionaria maior representatividade e assertividade aos resultados.

A partir dos ensaios de caracterização dos rejeitos de flotação já com o projeto em operação, pode-se avaliar que o material apresenta características arenosas, conforme previsto no estudo de viabilidade, com identificação de diferenças na porcentagem de argila. Identificados nos ensaios DRX, MEV, limites Atterberg e caracterização granulométrica

Há ensaios que poderiam ter sido aplicados na fase de viabilidade, como, por exemplo, os limites de Atterberg. Dada a facilidade, rapidez e o baixo custo desses testes, eles forneceriam uma avaliação complementar das características do material, permitindo validar e refinar as interpretações obtidas por meio da análise granulométrica, especialmente quanto à presença e à influência da fração fina.

Além disso, é explicitado que o projeto básico da barragem estimou a capacidade do reservatório com base em valores de densidade superiores aos observados nos ensaios realizados. Caso o parâmetro de massa específica aparente de 1,09 g/cm³ seja confirmado o rejeito depositado, a capacidade prevista do reservatório poderá

não ser suficiente para atender às etapas finais do projeto, tornando necessária a execução de uma etapa de alteamento da estrutura.

Nesse cenário, recomenda-se também o monitoramento contínuo do reservatório e do comportamento da praia de rejeitos, a fim de avaliar se haverá necessidade do alteamento da barragem, e sim, o momento mais adequado para sua execução. A geometria da praia foi inicialmente estimada considerando declividade emersa de 1% e declividade submersa de 3%. Variações nessas características geométricas influenciam diretamente a otimização da capacidade do reservatório, podendo exigir a reavaliação do plano de disposição de rejeitos para acomodar os valores mais baixos dos parâmetros observados.

Outro aspecto relevante para as análises do rejeito ao longo da operação é que seu comportamento está diretamente relacionado ao tipo de processamento empregado, à natureza do depósito, à quantidade de água presente na polpa e às condições de deposição do material. Dessa forma, qualquer alteração operacional que possa impactar a granulometria dos rejeitos deverá ser avaliada, uma vez que poderá influenciar seu comportamento geotécnico e hidráulico, bem como as premissas adotadas para o desempenho e a capacidade do reservatório.

4. PALAVRAS-CHAVE

Rejeitos de flotação, caracterização geotécnica, estudo de viabilidade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). (2025) – “Boletim de Barragens de Mineração – Boletim Mensal de Outubro de 2025”, Ministério de Minas e Energia, Brasília, Brasil.

[2] ROBINSKY, E.I (1999). Thickened Tailings Disposal in The Mining Industry. Toronto.

[3] ABNT (2024) – NBR 10004: Resíduos sólidos — Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[4] ABNT (2004) – NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[5] ABNT (2004) – NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. [5] ABNT (2016) – NBR 6459: Solo — Determinação do limite de liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[6] ABNT (2016) – NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[7] ABNT (2025) – NBR 7181: Solo — Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[8] ABNT (2025) – NBR 6458: Solo — Determinação da massa específica dos grãos.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

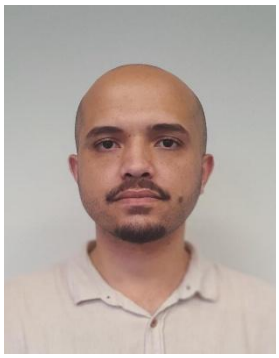
[9] ABNT (2016) – NBR 6459: Solo — Determinação do limite de liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[10] ABNT (2025) – NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

[11] FATIMAH, S.; RAGADHITA, R.; AL HUSAENI, D. F.; NANDIYANTO, A. B. D. (2021) – “How to Calculate Crystallite Size from X-Ray Diffraction (XRD) using Scherrer Method”, ASEAN Journal of Science and Engineering, Volume 1, Indonésia.

[12] GOLDSTEIN, J.; et al. (2018) – *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, 4th Edition, Springer, New York

	**Sara Martins NEVES** Engenheira Civil pelo Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix (2015–2020), Especialista em Geotecnia pela INBEC (2021–2023) e mestranda em Engenharia Mineral pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) (2025–2027). Atua como Engenheira Geotécnica na área de Segurança de Barragens, com experiência na fase operacional, desenvolvendo atividades voltadas ao monitoramento, avaliação geotécnica e gestão da integridade estrutural de barragens.
	**Marisônia SANTOS** Graduada em Geologia pelo Centro Universitário de Belo Horizonte (Unibh - 2018). Pós Graduada em Engenharia em Geotecnia pela Universidade Católica de Minas Gerais (2020) e Pós Graduada em Engenharia Hidrogeológica pela Universidade Católica de Minas Gerais (2024). Experiência na área de geotecnia e hidrogeológia com ênfase em gerenciamento de segurança e operação de barragens de rejeitos.
	**Aloysio Portugal Maia SALIBA** Engenheiro Civil, mestre e doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Possui 30 anos de atuação na área de recursos hídricos e geotecnia. Foi professor adjunto na graduação e pós-graduação do departamento de engenharia da UFMG de 2016 a 2023. Possui expertise em coordenação de trabalhos dentro e fora do Brasil.

	**Eduardo Araújo de Souza LEÃO** Engenheiro Sanitarista e Ambiental (2004), mestre em hidrogeologia (2015), pós-graduado em gestão de recursos hídricos (2009) e gestão ambiental industrial (2008) com 15 anos de experiência em gestão mineral, ambiental, elaboração de projetos e planejamento estratégico atuando com excelência operacional.
	**Lucas Henrique VIEIRA** Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF – 2017) e Mestre em Geotecnia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ - 2020). Experiência com estudos e projetos geotécnicos voltados à mineração, como barragens de água e rejeito, pilhas de estéril e rejeito, monitoramento geotécnico. Além disso atua no gerenciamento de equipes multidisciplinares.

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

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE REJEITOS CIANETADOS: ANÁLISE DAS VARIAÇÕES AO LONGO DO PRIMEIRO ANO DE OPERAÇÃO.

Sara Martins NEVES
Engenheira Civil - Brazauro Recursos Minerais

Marisônia Soares dos SANTOS
Geóloga - Brazauro Recursos Minerais

Eduardo LEÃO
Engenheiro Sanitário e Ambiental – Brazauro Recursos Minerais

Aloysio Portugal Maia SALIBA
Engenheiro Civil, Dr. EEUFMG – Tec3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda.

Lucas Henrique VIEIRA

Engenheiro Geotécnico, MSc. COPPE/UFRJ – Tec3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda.

RESUMO

No processamento de ouro em grandes empreendimentos de mineração, no Brasil e no exterior, é amplamente empregado o processo de cianetação, cuja função principal é promover a lixiviação do minério. Os rejeitos cianetados apresentam propriedades físicas e geotécnicas que podem variar ao longo do tempo, especialmente entre a fase inicial de operação (*ramp-up*) e a estabilização da planta metalúrgica. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a evolução dessas propriedades após a disposição dos rejeitos em um reservatório, no primeiro ano operacional. Essa avaliação contribui para o aprimoramento da compreensão do comportamento do rejeito, com reflexos diretos na segurança e na gestão operacional. O estudo baseia-se na avaliação de ensaios de caracterização geotécnica, ensaios reológicos, análises por microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X, cujos resultados permitiram analisar o comportamento do material e sua evolução temporal, evidenciando as variações de suas propriedades e suas implicações nos processos de disposição.

ABSTRACT

In gold processing at large-scale mining operations, both in Brazil and internationally, the cyanidation process is widely employed, with its primary function being ore leaching. Cyanided tailings exhibit physical and geotechnical properties that may vary

over time, particularly between the initial operational phase (ramp-up) and the stabilization of the metallurgical plant. In this context, the present study aims to evaluate the evolution of these properties after disposal in a tailings storage facility during its first year of operation. This assessment contributes to improving the understanding of tailings behavior, with direct implications for safety and operational management. The study is based on the evaluation of geotechnical characterization tests, rheological tests, Scanning Electron Microscopy analyses, and X-ray Diffraction analyses, whose results enabled the assessment of the material behavior and its temporal evolution, highlighting the variations in its properties and their implications for disposal processes.

1. INTRODUÇÃO

A disposição de rejeitos cianetados em barragens de mineração é um tema de relevância para a engenharia geotécnica e ambiental, principalmente devido aos riscos associados à estabilidade das estruturas e ao potencial de contaminação do meio ambiente. No processamento do ouro, a cianetação é um dos métodos mais utilizados em razão de sua elevada eficiência na recuperação do metal, podendo alcançar valores superiores a 90%, dependendo das características do minério (HABASHI, 2005). Como resultado desse processo, são gerados rejeitos com propriedades físicas, químicas e geotécnicas que podem sofrer alterações ao longo do tempo, especialmente nos primeiros anos após sua disposição (MUDDER; BOTZ; SMITH, 2001).

Do ponto de vista geotécnico, as propriedades dos rejeitos influenciam diretamente o comportamento das barragens, afetando parâmetros como resistência ao cisalhamento, compressibilidade, permeabilidade e adensamento. Estudos demonstram que essas propriedades evoluem em função do tempo de deposição, das condições de drenagem e das transformações físico-químicas ocorridas durante a operação da estrutura (VICK, 1990; JEWELL; FOURIE, 2006). Dessa forma, compreender essa evolução é fundamental para a avaliação do desempenho geotécnico e da segurança das barragens de rejeitos.

Nesse contexto, este estudo foi desenvolvido em uma barragem de efluentes cianetados, localizada na Mesorregião do Sudoeste Paraense, região Norte do Brasil. A estrutura foi projetada como barragem secundária do empreendimento, destinada ao armazenamento de aproximadamente 5% dos rejeitos gerados pela planta metalúrgica ao longo de sua vida útil, estimada em cinco anos. Construída entre 2023 e 2024, a barragem possui capacidade aproximada de 957 mil m³, comprimento de crista de 1.424 m e foi concebida para operar em circuito fechado, com recirculação completa da água de processo. Sua fundação é constituída predominantemente por solos residuais de granitoide, caracterizados por meio de investigações geológico-geotécnicas, ensaios de laboratório e análises de estabilidade e percolação.

Os estudos realizados na fase de projeto classificaram os rejeitos como perigosos, conforme a ABNT NBR 10004 (ABNT, 2024), justificando a adoção de medidas de engenharia voltadas à segurança da estrutura e à proteção ambiental.

Além da disposição dos rejeitos, a barragem também atua como reservatório de água de processo, contribuindo para a recirculação hídrica do empreendimento e para o controle operacional do sistema. O armazenamento e o reaproveitamento dessa água auxiliam na gestão dos recursos hídricos e no controle do nível d'água durante períodos de maior pluviometria.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação da evolução das propriedades geotécnicas dos rejeitos cianetados foi realizada por meio da comparação entre os parâmetros obtidos nos estudos de viabilidade da barragem e os resultados das campanhas de investigação executadas após o início da operação da estrutura. Essa abordagem permitiu analisar as

alterações ocorridas nas características físicas, químicas, mineralógicas e reológicas do material ao longo do período avaliado.

Os estudos iniciais, realizados durante a fase de viabilidade, compreenderam ensaios básicos de caracterização do rejeito, incluindo o teste de densidade de sedimentação e a determinação dos Limites de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP). Esses resultados foram utilizados como referência para a avaliação do comportamento inicial do material após o processamento mineral e sua comparação com as condições observadas após a disposição na barragem.

Com o início da operação da estrutura, foram coletadas amostras representativas dos rejeitos dispostos no reservatório, para realização de ensaios complementares de caracterização. As análises compreenderam ensaios geotécnicos, classificação ambiental, análises químicas, mineralógicas, microestruturais e reológicas, conforme descrito nos itens a seguir. A Tabela 1 apresenta a identificação, o local de coleta e a massa das amostras obtidas para a execução do programa experimental.

Tabela 1 – Identificação, Local de coleta e peso das amostras

Amostra	Local	Peso (kg)
AM-01 CTSF	Barragem cianetada – área da praia	136,57
AM-02 CTSF	Barragem cianetada – área da praia	144,13

As amostras coletadas foram submetidas ao programa de caracterização laboratorial previsto para esta etapa do estudo. A Tabela 2 apresenta o quantitativo de ensaios realizados em cada amostra, evidenciando que ambas foram analisadas por meio do mesmo conjunto de determinações, garantindo uniformidade na obtenção e comparação dos resultados.

Tabela 2 – Quantidade de ensaios

Amostra	Teor de Umidade	Massa Esp. dos Grãos	Granulometria Completa	Limites de Atterberg	Reologia Rotacional	Classificação de Resíduos Sólidos	DRX	MEV
AM-01 CTSF	X	X	X	X	X	X	X	X
AM-02 CTSF	X	X	X	X	X	X	X	X

2.1 Caracterização inicial dos rejeitos

Para avaliação do comportamento inicial dos rejeitos cianetados dispostos na barragem, foram utilizados os resultados dos ensaios realizados nos estudos de viabilidade, incluindo o teste de densidade de sedimentação e os ensaios de Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP).

O ensaio de densidade de sedimentação foi utilizado para avaliar o comportamento de deposição, acomodação e adensamento do rejeito ao longo do tempo, enquanto os ensaios de limites de consistência permitiram determinar a plasticidade do material e sua sensibilidade às variações de umidade.

2.2 Classificação dos resíduos sólidos

A classificação dos rejeitos foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 10004 (2024), NBR 10005 (2004) e NBR 10006 (2004), utilizadas para avaliação das características químicas e do potencial de periculosidade dos resíduos sólidos.

De acordo com os critérios normativos, os resíduos podem ser classificados como Classe I – perigosos ou Classe II – não perigosos. O rejeito avaliado neste estudo foi classificado como Classe I – perigoso, conforme indicado no projeto executivo da barragem, devido à presença residual de compostos cianetados provenientes do processo de beneficiamento mineral.

2.3 Caracterização granulométrica e propriedades físicas

As amostras de rejeito foram preparadas conforme a ABNT NBR 6457 (2016) e submetidas aos ensaios de caracterização geotécnica. A análise granulométrica foi realizada por peneiramento e sedimentação, conforme a ABNT NBR 7181 (2025), e a determinação da massa específica dos grãos seguiu os procedimentos da ABNT NBR 6458 (2025).

Também foram realizados ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, conforme as ABNT NBR 6459 (2025) e NBR 7180 (2025), respectivamente. Esses ensaios permitiram avaliar a distribuição granulométrica, a composição física e as características de consistência dos rejeitos, possibilitando a comparação das propriedades do material em diferentes períodos de disposição.

2.4 Caracterização química, mineralógica e microestrutural

Para avaliação da composição química, mineralógica e microestrutural dos rejeitos cianetados, foram coletadas quatro amostras representativas em diferentes pontos do reservatório, identificadas como AM-CTSF. As amostras foram submetidas às análises de Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A análise por FRX foi utilizada para determinação dos principais elementos químicos presentes no rejeito, permitindo identificar os constituintes pr1edominantes do material. A DRX foi aplicada para identificação das fases mineralógicas presentes, enquanto a MEV possibilitou avaliar a morfologia, textura e distribuição das partículas em escala microscópica.

A utilização conjunta dessas técnicas possibilitou complementar a caracterização geotécnica dos rejeitos, contribuindo para a avaliação da influência dos aspectos químicos, mineralógicos e microestruturais no comportamento do material.

2.5 Ensaio de Reologia Rotacional

A avaliação do comportamento reológico dos rejeitos foi realizada por meio de ensaios de reologia rotacional utilizando o reômetro Anton Paar, modelo Rheolab QC. Os

ensaios foram conduzidos com geometria do tipo vane, indicada para materiais particulados e suspensões concentradas.

Antes das medições, as amostras foram submetidas a uma etapa de pré-cisalhamento para padronização das condições iniciais do material e redução dos efeitos associados à sedimentação. Posteriormente, foram realizadas varreduras em rampa crescente de taxa de cisalhamento, permitindo avaliar o comportamento do rejeito sob diferentes condições de deformação.

Os resultados obtidos nos ensaios geotécnicos, químicos, mineralógicos e reológicos foram posteriormente comparados aos dados de referência dos estudos de viabilidade, permitindo avaliar a evolução das propriedades dos rejeitos cianetados durante o primeiro ano de operação da barragem.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados obtidos mostraram predominância das frações de silte e de areia fina, baixa plasticidade e elevada presença de materiais ferruginosos e sulfetados, identificados principalmente por meio dos ensaios de FRX e DRX. As análises por MEV também permitiram observar partículas heterogêneas e a presença significativa de finos, características importantes para avaliação do comportamento geotécnico e reológico do material.

Dessa forma, observa-se que os estudos iniciais de 2017 forneceram uma base importante para o entendimento preliminar do rejeito cianetado, enquanto os estudos desenvolvidos posteriormente ampliaram significativamente o nível de detalhamento das análises, incorporando técnicas avançadas capazes de avaliar não apenas as propriedades físicas, mas também aspectos mineralógicos, químicos e reológicos relacionados ao desempenho e à segurança operacional da barragem.

2.6 Ensaios do Rejeito

A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos nos ensaios realizados e suas respectivas interpretações:

2.6.1 Caracterização geotécnica

Um resumo dos resultados obtidos para os ensaios de caracterização geotécnica está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização das amostras na fase de operação

ID AMOSTRA	FRAÇÕES						TEOR DE UMIDADE	DENSIDADE DOS GRÃOS	LIMITE DE CONSISTÊNCIA		
	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)	(%)	Ys (g/cm^3)	LL (%)	LP (%)	IP (%)

AM-01 CTSF	0,91	52,31	41,89	4,85	0,04	0,00	11,64	3,915	NL	NP	NP
AM-02 CTSF	0,51	25,29	56,22	17,75	0,24	0,00	8,10	3,933	NL	NP	NP

Os resultados da caracterização geotécnica das amostras de rejeito coletadas diretamente na barragem indicaram predominância das frações de silte e de areia fina. As amostras AM-01 CTSF e AM-02 CTSF apresentaram maiores percentuais de areia fina, com valores de 41,89% e 56,22%, respectivamente. Já as amostras coletadas na praia de rejeitos em formação no reservatório apresentaram predominância de silte, com valores de 65,49% para a Amostra 01 e 63,85% para a Amostra 02.

Os teores de argila e de pedregulho foram baixos em todas as amostras, indicando um comportamento predominantemente fino. Os teores de umidade variaram entre 8,10% e 16,23%, enquanto a densidade dos grãos variou entre 3,274 g/cm³ e 3,933 g/cm³, refletindo diferenças na composição mineralógica e nas condições de deposição do rejeito na barragem.

Em relação aos limites de consistência, todas as amostras foram classificadas como não líquidas (NL) e não plásticas (NP), indicando baixa plasticidade e reduzida sensibilidade às variações de umidade. De forma geral, os resultados mostram que os rejeitos apresentam comportamento predominantemente siltoso-arenoso, o que é uma característica importante para a avaliação do comportamento geotécnico e das condições de disposição do material na barragem.

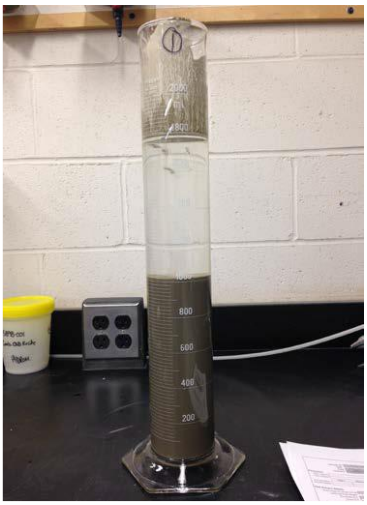
Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização geotécnica permitiram avaliar o comportamento físico dos rejeitos cianetados dispostos na barragem no período analisado. As amostras coletadas na praia de rejeitos do reservatório apresentaram variações relacionadas às condições de deposição do material e à operação da estrutura. A análise granulométrica, dos teores de umidade, da massa específica dos grãos e dos limites de consistência forneceu informações importantes para compreender o comportamento geotécnico dos rejeitos e suas condições de disposição ao longo do tempo.

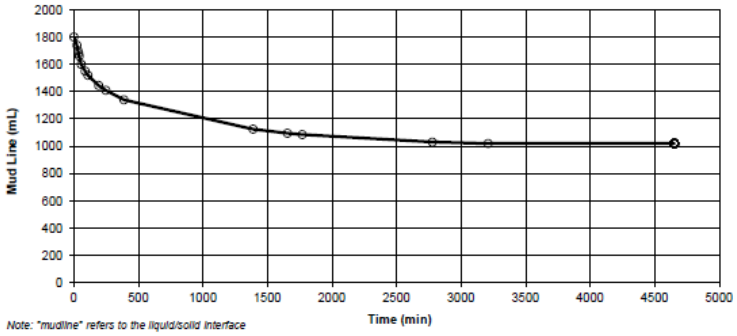
2.6.2 Ensaio de Sedimentação por coluna

O ensaio de sedimentação por coluna avaliou o comportamento de deposição e adensamento do rejeito ao longo do tempo. Os resultados mostraram densidade inicial da polpa de 1428 g/L e teor de sólidos de 44,4%, atingindo ao final do ensaio densidade sedimentada de 1755 g/L e teor de sólidos de 63,7%, indicando aumento do adensamento do material após a deposição.

Os ensaios de LL, LP e IP apresentaram valores de 25%, 22% e 2%, respectivamente, indicando baixa plasticidade do rejeito. Esse comportamento sugere menor sensibilidade às variações de umidade e menor tendência a deformações volumétricas.

De forma geral, os resultados indicam que o rejeito apresenta comportamento fino, baixa plasticidade e tendência ao adensamento gradual, características importantes para o entendimento do comportamento geotécnico e operacional da Barragem de Rejeitos Cianetados (Figura 1).





Note: "mudline" refers to the liquid/solid interface

Final Test Results

Parameter	Unit	Value
Total settling time	min	4652
Final mudline	mL	1020
Final percent solids	%	63.7
Final settled density	g/L	1755

Figura 1 - Ensaio de Sedimentação por coluna – Barragem de Rejeitos Cianetados.

2.6.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises por MEV permitiram observar a microestrutura e a morfologia das partículas presentes nos rejeitos da Barragem de Rejeitos Cianetados, fornecendo informações importantes sobre a textura, a distribuição granulométrica e a interação entre os minerais que compõem o material disposto no reservatório da estrutura.

A Figura 2 apresenta diferentes pontos analisados na amostra, permitindo observar uma estrutura bastante heterogênea, composta por partículas de tamanhos e formatos diversos. As imagens mostram predominância de partículas angulosas e subangulosas, além de grande quantidade de finos preenchendo os vazios entre os grãos maiores. Também é possível observar aglomerados minerais e partículas com superfícies irregulares, o que indica diferentes estágios de fragmentação e de deposição do rejeito.

As análises evidenciam uma microestrutura predominantemente fina e compacta, compatível com os resultados granulométricos obtidos anteriormente, que indicaram predominância das frações de silte e de areia fina. A presença significativa de partículas finas pode influenciar diretamente o comportamento do rejeito quanto ao adensamento, à retenção de umidade e ao comportamento reológico na barragem.

Outro aspecto observado nas imagens é a presença de partículas com elevado brilho eletrônico em alguns pontos da amostra, normalmente associadas a minerais com maior concentração de ferro e de sulfetos, corroborando os resultados obtidos nos ensaios de FRX e DRX, que identificaram predominância de pirita e elevados teores de ferro e enxofre no rejeito.

De forma geral, os resultados do MEV permitiram uma melhor compreensão da microestrutura do material presente no reservatório, evidenciando um rejeito com composição heterogênea, presença significativa de partículas finas.

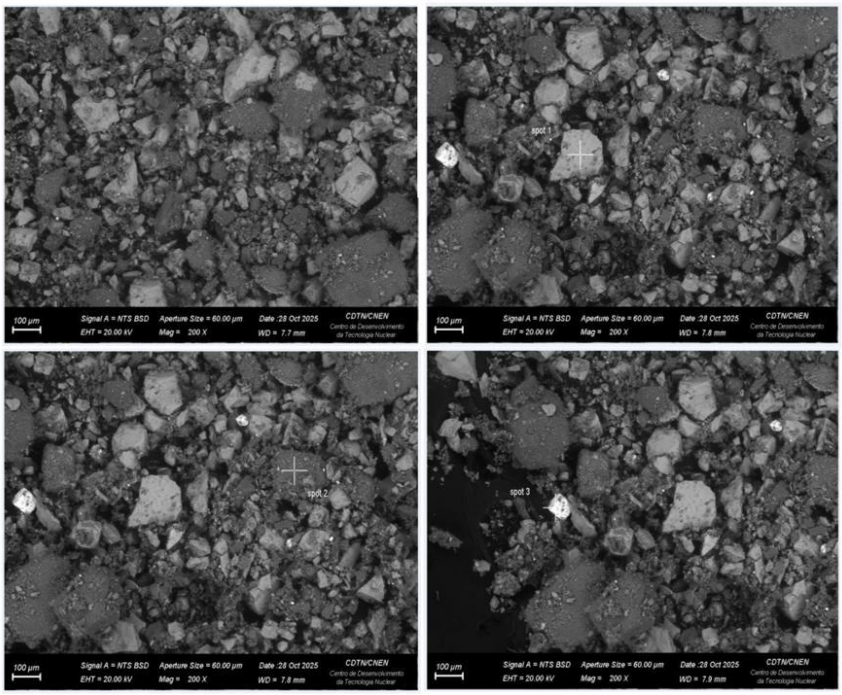


Figura 2 - Resultado do MEV.

2.6.4 Fluorescência de Raios X (FRX)

Para a análise do ensaio, foram utilizadas amostras compostas dos rejeitos AM-01-CTSF e AM-02-CTSF, combinadas em partes iguais. O método de FRX permite identificar os elementos químicos presentes no material por meio da emissão de radiação característica após o bombardeamento da amostra com raios X.

Os resultados, apresentados na Tabela 4, indicaram predominância de enxofre (S), com teor de 44,81%, e ferro (Fe), com 39,02%, além da presença de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), magnésio (MgO), cálcio (CaO) e outros elementos em menores concentrações. A elevada presença de enxofre e ferro sugere forte influência de minerais sulfetados e ferruginosos no rejeito, característica comum em resíduos provenientes do beneficiamento de ouro.

A presença de sílica e alumina indica a participação de minerais silicáticos na composição do material, enquanto os baixos teores de outros óxidos evidenciam menor representatividade desses elementos na estrutura mineralógica do rejeito. De forma geral, os resultados obtidos no FRX contribuíram para a compreensão da composição química do material disposto na barragem, fornecendo informações importantes para avaliação do comportamento geotécnico, químico e ambiental dos rejeitos ao longo da operação da estrutura.

Tabela 4 - Percentual de elementos químicos - Amostra Barragem de Rejeitos Cianetados.

Al2O3	**CaO**	**Cr2O3**	**Fe**	**Fe2O3**	**K2O**	**MgO**	**MnO**
2,19	0,53	<0,01	39,02	-	0,64	0,83	0,03
Na2O	**P2O5**	**SiO2**	**TiO2**	**S**	**ZnO**	**CuO**	**PbO**
0,12	0,06	10,21	0,34	44,81	0,28	0,22	0,72

2.6.5 Difração de Raios X (DRX)

A interpretação do difratograma permitiu identificar as principais fases mineralógicas presentes na amostra por meio da comparação dos picos observados com bancos de dados cristalográficos.

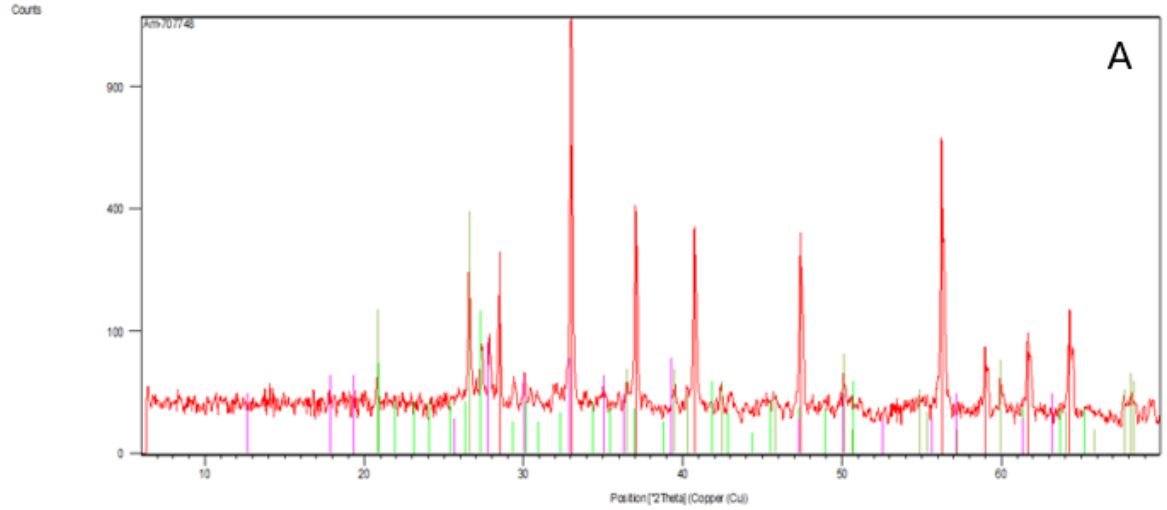
Os resultados, apresentados na Figura 3, mostraram predominância expressiva de pirita (FeS_2), correspondente a aproximadamente 81,62% da composição mineralógica identificada. Também foram identificados quartzo (SiO_2), com cerca de 10,00%, microclínio, com 5,03%, além de uma pequena fração de minerais não identificados, equivalente a 3,35% da amostra.

A elevada concentração de pirita indica que o rejeito apresenta forte característica sulfetada, compatível com materiais provenientes do beneficiamento de minério aurífero. A presença predominante desse mineral está diretamente associada aos elevados teores de enxofre e de ferro identificados anteriormente nos ensaios de FRX, o que confirma a consistência dos resultados químicos e mineralógicos obtidos.

Do ponto de vista geoquímico, a elevada presença de pirita merece atenção devido ao potencial de oxidação do sulfeto quando exposto ao oxigênio e à água, o que pode favorecer processos de geração de drenagem ácida ao longo do tempo. Esse comportamento pode influenciar diretamente a qualidade da água armazenada no reservatório e reforça a importância dos sistemas de impermeabilização e controle ambiental adotados na barragem, como o revestimento em geomembrana e o sistema de detecção de vazamentos.

Em relação ao comportamento geotécnico, minerais sulfetados finos, como a pirita, podem influenciar propriedades como densidade, sedimentação e comportamento reológico do rejeito. A elevada presença de partículas finas associadas a minerais sulfetados também pode contribuir para alterações nas características físicas do material ao longo do tempo, principalmente devido a processos de oxidação e intemperismo.

A presença de quartzo indica participação significativa de minerais silicáticos na composição do rejeito. Esse mineral apresenta elevada resistência química e mecânica, o que contribui para o comportamento granular do material e influencia propriedades como a granulometria e a resistência ao cisalhamento. Já o microclínio, pertencente ao grupo dos feldspatos, indica a presença de minerais alumino-silicáticos provenientes da rocha de origem do minério processado.



B

File: 107748

No.	Vi...	Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Crystal System	%
1	✔	00-024-0076	Pyrite	Fe S2	Cubic	81,62
2	✔	00-005-0490	Quartz, low	Si O2	Hexagonal	10,00
3	✔	00-012-0703	Microcline	K Al Si3 O8	Anorthic	5,03
4	✔	00-012-0519	Unknown	Unknown	nown	3,35
						100,00

Figura 3 – A) Difratograma. B) Minerais da amostra – Barragem Rejeitos Cianetados.

2.6.6 Reologia Rotacional

Os ensaios de reologia rotacional realizados nas amostras AM-01 e AM-02, apresentados, respectivamente, na Figura 4 e Figura 5, mostraram comportamento semelhante entre as amostras analisadas, com forte influência da concentração de sólidos sobre o comportamento de fluxo do material. Em ambas, observou-se aumento da tensão de cisalhamento à medida que aumentava a concentração de sólidos, indicando maior resistência ao escoamento e maior interação entre as partículas do rejeito.

As maiores tensões de cisalhamento foram registradas nas concentrações mais elevadas, principalmente entre os fluxos de 45% e 52,5%, demonstrando que o aumento da quantidade de sólidos favorece o crescimento da resistência interna da suspensão. Esse comportamento é típico de rejeitos minerais com elevada presença de partículas finas e materiais sulfetados.

Os gráficos de viscosidade das duas amostras apresentaram redução gradual da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, caracterizando comportamento pseudoplástico. Isso indica que o rejeito tende a apresentar maior viscosidade em condições de baixa movimentação, porém reduz sua resistência ao fluxo quando submetido a maiores esforços de cisalhamento.

Os resultados obtidos possuem relação direta com os ensaios granulométricos e análises por MEV, que mostraram predominância das frações de silte e areia fina,

além da presença significativa de partículas finas preenchendo os vazios entre os grãos maiores. Essa microestrutura favorece maior contato entre partículas, aumentando a viscosidade e a tensão necessária para iniciar o escoamento do material.

Além disso, os ensaios de FRX e DRX identificaram elevada presença de ferro, enxofre e minerais sulfetados, principalmente pirita, nas amostras analisadas. A presença desses minerais contribui para o aumento da densidade específica e influencia diretamente o comportamento reológico do rejeito, principalmente em concentrações mais elevadas de sólidos.

Outro aspecto observado nas duas amostras foi a tendência de estabilização e redução da viscosidade em taxas de cisalhamento mais elevadas, indicando reorganização estrutural das partículas durante o fluxo. Esse comportamento é importante para compreender as condições de transporte hidráulico, deposição e adensamento dos rejeitos dentro da barragem. Os resultados mostraram que o comportamento reológico do rejeito está diretamente relacionado à concentração de sólidos, à presença de finos e à composição mineralógica do material.

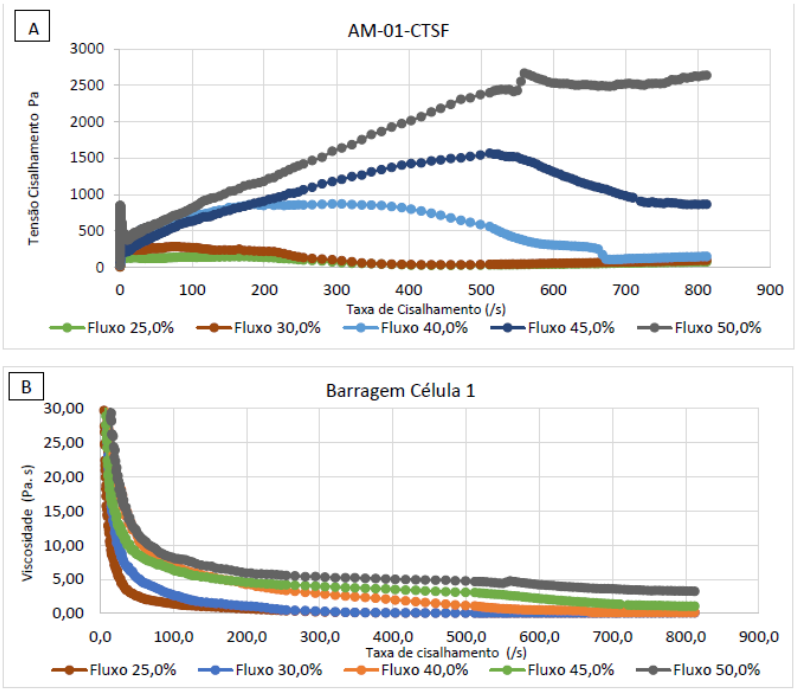


Figura 4 – A) Gráfico de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Cisalhamento – AM-01. B) Gráfico de Viscosidade x Taxa de Cisalhamento – AM-01.

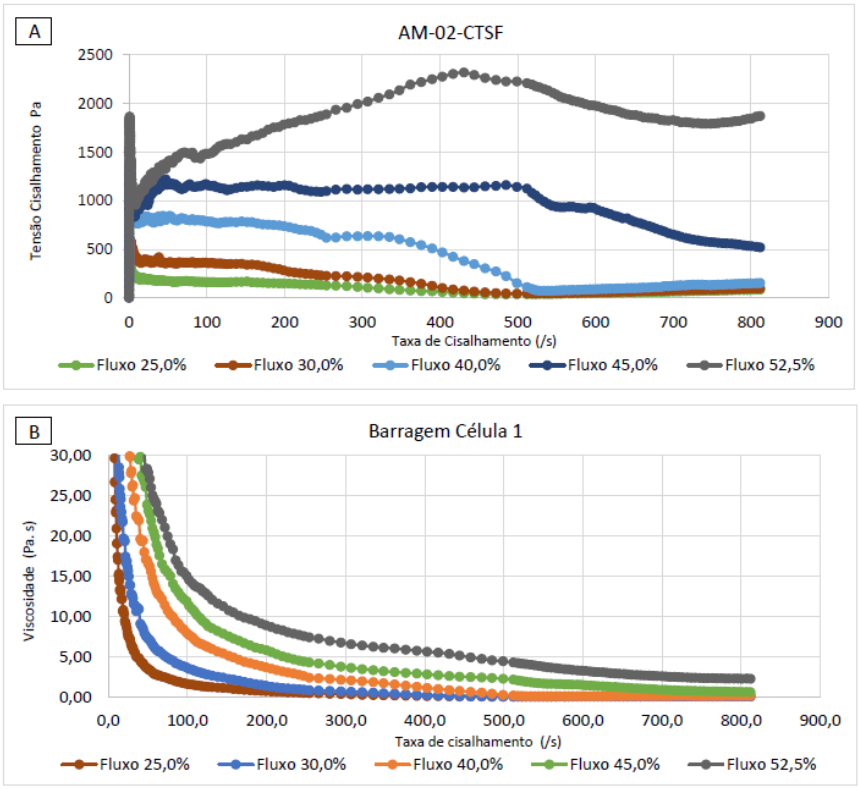


Figura 5 – A) Gráfico de Tensão de Cisalhamento x Taxa de Cisalhamento – AM-02. B) Gráfico de Viscosidade x Taxa de Cisalhamento – AM-02.

4. CONCLUSÕES

Os estudos de viabilidade do projeto incluíram a caracterização geotécnica dos rejeitos cianetados, cujos resultados foram utilizados como referência para o dimensionamento da barragem e avaliação do comportamento do material durante a operação. Segundo SGS Canada (2017), o rejeito tratado apresentou predominância de partículas finas, com maior participação da fração siltosa (75%), seguida da fração argila (15%) e da fração arenosa (10%), composta principalmente por areia fina (Tabela 5). Os ensaios dos Limites de Atterberg determinaram limite de liquidez (LL) de 25%, limite de plasticidade (LP) de 22% e índice de plasticidade (IP) de 2%, classificando o material como ML (silte de baixa plasticidade), conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), estabelecido pela ASTM D2487 (ASTM, 2017).

Tabela 5 - Caracterização granulométrica e limites de consistência do rejeito cianetado tratado (SGS Canada, 2017).

ID AMOSTRA	FRAÇÕES			LIMITE DE CONSISTÊNCIA		
	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
CND 1-3	15	75	10	25	22	2

Os resultados obtidos após o primeiro ano de operação realizada pela FONNTES GEOTÉCNICA (2026), permitiram avaliar a evolução das propriedades geotécnicas do rejeito em condições reais de disposição. A comparação com os dados de

caracterização inicial indicou manutenção do comportamento predominantemente siltoso, porém com alteração na distribuição granulométrica, caracterizada pelo aumento relativo da fração arenosa e redução da fração argilosa. Essa variação está associada aos processos de segregação hidráulica durante a deposição, nos quais partículas de maior dimensão tendem a sedimentar mais rapidamente próximas ao ponto de lançamento, enquanto partículas finas permanecem em suspensão por maior período e são transportadas para regiões mais distantes do reservatório.

Apesar da redistribuição granulométrica, o rejeito manteve características geotécnicas semelhantes às previstas na etapa de projeto, com baixa plasticidade ou ausência de plasticidade, comportamento típico de materiais siltosos.

As análises de fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX) identificaram predominância de ferro, enxofre e minerais sulfetados, com destaque para a pirita. A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciou uma microestrutura heterogênea, caracterizada pelo preenchimento dos vazios entre partículas maiores por materiais finos, condição que pode contribuir para o comportamento reológico observado, com aumento da tensão de cisalhamento em maiores concentrações de sólidos e comportamento predominantemente pseudoplástico.

Essas características apresentam influência direta sobre o processo de disposição dos rejeitos, afetando a formação da praia, a geometria do depósito e a evolução do adensamento ao longo da operação. O aumento da concentração de sólidos e da densidade do material depositado pode favorecer maior eficiência de ocupação do reservatório e influenciar a capacidade de armazenamento da estrutura.

Os resultados evidenciam a importância do acompanhamento contínuo das propriedades físicas, químicas e reológicas dos rejeitos como ferramenta para o gerenciamento operacional da barragem, otimização da disposição e avaliação do desempenho da estrutura ao longo de sua vida útil.

5. PALAVRAS-CHAVE

Rejeitos cianetados; Barragem de rejeitos; Caracterização geotécnica; Análise Reológica; Análise Mineralógica; Análise Microscópica; Fluorescência de Raios X (FRX); Sedimentação de rejeitos; Disposição de rejeitos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] HABASHI, F. (2005) – “Developments in Mineral Processing: Gold Extraction and Recovery Processes”, Elsevier, Canadá.

[2] MUDDER, T.; BOTZ, M.; SMITH, A. (2001) – *Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes*. 2nd ed., Mining Journal Books Ltd., London, United Kingdom.

[3] VICK, S. G. (1990) – *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers Ltd., Vancouver, Canada.

[4] JEWELL, R. J.; FOURIE, A. B. (2006) – *Paste and Thickened Tailings: A Guide*. Australian Centre for Geomechanics (ACG), Perth, Australia.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2024) – “NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação”, Rio de Janeiro, Brasil.

[6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2004) – “NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos”, Rio de Janeiro, Brasil.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2004) – “NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos”, Rio de Janeiro, Brasil.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2016) – “NBR 6457: Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização”, Rio de Janeiro, Brasil.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2025) – “NBR 7181: Solo – Análise granulométrica”, Rio de Janeiro, Brasil.

[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2025) – “NBR 6458: Solo – Determinação da massa específica dos grãos”, Rio de Janeiro, Brasil.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6459:2025: Solos — Determinação do limite de liquidez. 3. ed. São Paulo: ABNT, 2025.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (2025) – “NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade”, Rio de Janeiro, Brasil.

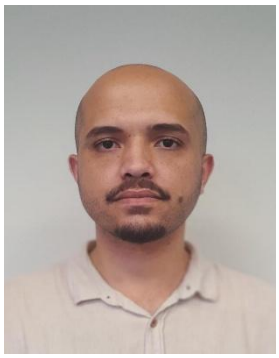
[13] SGS MINERALS SERVICES. (2017) – “Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index – Comb. CND Residue”, Eldorado Gold Corporation, SGS Reference No. 15898-001.

[14] SGS MINERALS SERVICES. (2017) – “Settled Density Test – Comb. CND Residue”, Eldorado Gold Corporation, SGS Reference No. 15898-001.

[15] ASTM INTERNATIONAL. (2017). *ASTM D2487-17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).* West Conshohocken, PA: ASTM International.

[16] FONNTES GEOTÉCNICA. (2026) – “Relatório Técnico de Resultados de Ensaios de Laboratório da Barragem Célula 1 – FG-2579-GMI-O-BA-RT02-03”, Belo Horizonte, Brasil.

	**Sara Martins NEVES** Engenheira Civil pelo Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix (2015–2020), Especialista em Geotecnia pela INBEC (2021–2023) e mestranda em Engenharia Mineral pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) (2025–2027). Atua como Engenheira Geotécnica na área de Segurança de Barragens, com experiência na fase operacional, desenvolvendo atividades voltadas ao monitoramento, avaliação geotécnica e gestão da integridade estrutural de barragens.
	**Marisônia SANTOS** Graduada em Geologia pelo Centro Universitário de Belo Horizonte (Unibh - 2018). Pós Graduada em Engenharia em Geotecnia pela Universidade Católica de Minas Gerais (2020) e Pós Graduada em Engenharia Hidrogeológica pela Universidade Católica de Minas Gerais (2024). Experiência na área de geotecnia e hidrogeológia com ênfase em gerenciamento de segurança e operação de barragens.
	**Aloysio Portugal Maia SALIBA** Engenheiro Civil, mestre e doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Possui 30 anos de atuação na área de recursos hídricos e geotecnia. Foi professor adjunto na graduação e pós-graduação do departamento de engenharia da UFMG de 2016 a 2023. Possui expertise em coordenação de trabalhos dentro e fora do Brasil.

	**Eduardo Araújo de Souza LEÃO** Engenheiro Sanitarista e Ambiental (2004), mestre em hidrogeologia (2015), pós-graduado em gestão de recursos hídricos (2009) e gestão ambiental industrial (2008) com 15 anos de experiência em gestão mineral, ambiental, elaboração de projetos e planejamento estratégico atuando com excelência operacional.
	**Lucas Henrique VIEIRA** Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF – 2017) e Mestre em Geotecnia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ - 2020). Experiência com estudos e projetos geotécnicos voltados à mineração, como barragens de água e rejeito, pilhas de estéril e rejeito, monitoramento geotécnico. Além disso atua no gerenciamento de equipes multidisciplinares.

Comitê Brasileiro de Barragens
I Simpósio sobre Solos Residuais Tropicais em Barragens
Tema SR.1
Belém – PA, 23 de setembro de 2026

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE SOLOS DE ALTERAÇÃO DE FILITO DOLOMÍTICO PRESENTES NA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM

Guilherme Henrique da Silva PINTO
Engenheiro Geotécnico - Pimenta de Ávila

André de Oliveira FARIA
Engenheiro Geotécnico - Pimenta de Ávila

Aryane Silva CARVALHO
Engenheira Geotécnica - Pimenta de Ávila

Caio Felipe Barbosa LACERDA
Engenheiro Geotécnico - Pimenta de Ávila

Vanessa Luiza THUMS
Engenheira Geotécnica - VALE

RESUMO

O processo de alteração da rocha decorre predominantemente devido ao fenômeno de intemperismo físico e químico, sem transporte significativo de material e com a preservação parcial das características da matriz rochosa de origem. Considerando o avanço desse processo, tem-se a evolução da condição de saprólito (solo residual jovem), ainda com um dado nível de preservação das características da rocha, para o solo residual, no qual ocorre perda significativa da estrutura, chegando até o solo residual mole (em certos casos), condição a qual possui completa desestruturação, indicando baixa resistência e alta deformabilidade. Dessa forma, tomando o contexto de fundações de barragens, o entendimento adequado das variações geológicas é essencial para a avaliação segura e consistente do comportamento geotécnico dos materiais. Nesse sentido, o objetivo do presente artigo é caracterizar o comportamento geomecânico dos solos provenientes da alteração do maciço rochoso de Filito Dolomítico, existentes na fundação de uma barragem de rejeitos, considerando as condições de: i) saprólito; ii) solo residual; e iii) solo residual mole. Para isso, foram utilizados dados provenientes de ensaios de campo (CPTu com dissipação de poropressão) e ensaios de laboratório (caracterização e ensaios triaxiais). A partir da interpretação dos dados, foi possível observar como o processo de intemperismo influenciou nas propriedades geomecânicas dos materiais, tendo em vista: i) a variação do comportamento dilatante até a condição contrátil e com fragilidade (perda de resistência); e ii) a redução dos valores dos parâmetros de resistência efetivos (coesão e ângulo de atrito) e não drenados (quando aplicáveis).

ABSTRACT

The rock weathering process occurs predominantly due to physical and chemical weathering, without significant material transport and with partial preservation of the characteristics of the parent rock matrix. As this process progresses, there is an evolution from saprolite (young residual soil), which still retains a certain degree of the original rock characteristics, to residual soil, where a significant loss of structure occurs, and in some cases to soft residual soil, a condition characterized by complete destructuring, indicating low strength and high deformability. In the context of dam foundations, a proper understanding of geological variations is essential for a safe and consistent assessment of the geotechnical behavior of materials. In this regard, the objective of this study is to characterize the geomechanical behavior of soils derived from the weathering of a Dolomitic Phyllite rock, present in the foundation of a tailings dam, considering the following conditions: (i) saprolite; (ii) residual soil; and (iii) soft residual soil. Based on this, data obtained from field tests (CPTu with pore pressure dissipation) and laboratory tests (index properties and triaxial tests) were used. Based on the interpretation of the data, it was possible to observe how the weathering process influenced the geomechanical properties of the materials, considering: (i) the variation from dilative to contractive behavior, including brittle response (strength loss); and (ii) the reduction in effective strength parameters (cohesion and friction angle) and undrained parameters (when applicable).

1. INTRODUÇÃO

A formação denominada como Quadrilátero Ferrífero, localizada na região centro-sul do estado de Minas Gerais, resulta da abundância de formações ferríferas e jazidas de minério de ferro, contidas em uma área aproximadamente retangular em mapa (SILVA [1]). Nesta região, tendo em vista a exploração do mineral ferrífero, foram construídas estruturas do tipo barragem para o aporte dos rejeitos e sedimentos oriundos do processo de beneficiamento. Nesse contexto, é comum a ocorrência de diferentes condições geológicas associadas à formação de solos de filito, dolomito e filito dolomítico, resultando no maior nível de complexidade durante a caracterização da fundação dessas estruturas (PIMENTEL [2]).

Conforme descrito por Azevedo *et al.* [3], a Formação Fecho do Funil é constituída por filitos, filitos dolomíticos e lentes de dolomito, compreendendo solos de alteração desde saprólitos a solo residual maduro, assim como camadas e/ou lentes de materiais de menor resistência (solo mole). As propriedades geotécnicas dos filitos são fortemente influenciadas pela litologia, com significativa dependência de relações estruturais, assim como o intemperismo ocorrido ao longo do tempo, a presença de certos argilominerais em sua formação e a ação da água (PIMENTEL [2]).

A capacidade de suporte dos filitos é variada, sendo baixa quando a solicitação é paralela à foliação e potencialmente moderada a alta quando solicitado de forma perpendicular à foliação. Por ter, em essência, textura siltosa, os filitos possuem planos de foliação e descontinuidades lisos que, se aliados a um elevado grau de fraturamento, alto grau de alteração e ação intempérica, aumentam a susceptibilidade a movimentos de massa e processos erosivos (SILVA [1]).

Considerando o contexto apresentado, diversas barragens localizadas no estado de Minas Gerais possuem tais litotipos como fundação. Dessa forma, o entendimento das propriedades destes materiais é de suma importância para a correta avaliação da condição de segurança das estruturas e dos modos de falha associados.

A fim de exemplificar uma condição típica de ocorrência do filito dolomítico, assim como ilustrar aspectos como heterogeneidade e foliação, é apresentado na Figura 1 o corte de taludes naturais localizados na ombreira de uma barragem. Como pode ser observado, o filito dolomítico apresenta diversas colorações advindas da intrusão de diferentes minerais em sua composição, o que, por consequência, pode modificar sua propriedade geotécnica de resistência e rigidez. Em complemento, no detalhe da Figura 1 é indicada a distribuição de foliação do material.



Figura 1 - Perfil de escavação do filito dolomítico e exemplo de foliação da amostra.

Em complemento, a Figura 2 apresenta os registros de campo representativos dos diferentes estágios de alteração do Filito Dolomítico indicado na Figura 1. A Figura 2a ilustra um talude escavado com a presença de saprólito, caracterizado pela coloração acinzentada e pela preservação da foliação, bem como a presença de fragmentos de rocha após prospecção realizada com martelo geológico. A Figura 2b indica uma exposição obtida a partir de escavação de trincheira, permitindo a realização de análise tátil-visual de um material classificado como solo residual. É possível observar a coloração amarelada e foliação reliquiar característica de um solo residual. Por fim, a Figura 2c ilustra a ocorrência do solo residual mole em um dos taludes de escavação. Nota-se que o material se encontra em estágio avançado de alteração, com perda total da estrutura reliquiar original. A elevada deformabilidade do solo mole é evidenciada pela facilidade de penetração e moldagem, indicando plasticidade e baixa resistência ao cisalhamento.

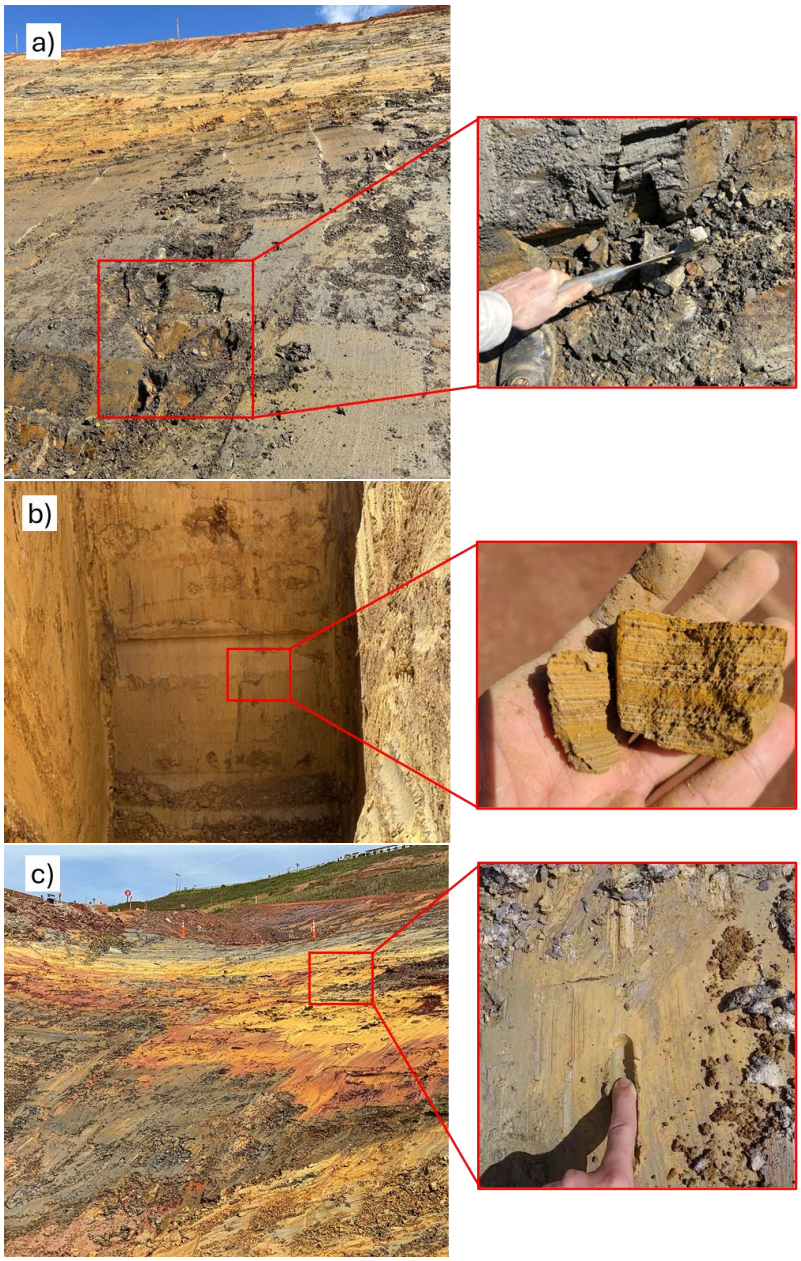


Figura 2 – Registros de campo das alterações do Filito Dolomítico nas condições de: a) saprólito, b) solo residual e c) solo residual mole.

Dado o referido contexto, bem como considerando a região do Quadrilátero Ferrífero, o presente trabalho tem por objetivo apresentar a caracterização completa dos solos de alteração de filito dolomítico existentes em uma Formação Fecho do Funil, bem como discutir os principais aspectos e desafios relacionados a presença desses materiais na fundação de uma barragem de rejeitos. Para a avaliação dos litotipos, foram utilizados ensaios de campo do tipo CPTu com dissipação de poropressão e de laboratório, compreendendo desde ensaios de caracterização a ensaios triaxiais drenados e não drenados.

2. INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE CAMPO

Para a investigação dos solos de filito dolomítico presentes na fundação da barragem analisada, foram executados ensaios de CPTu com dissipação de poropressão segundo as diretrizes da normal internacional ASTM D5778-20 [4], com velocidade de cravação padrão do cone de 2 cm/s e medição a cada 2 cm. Ademais, foram realizados ensaios de dissipação de poropressão a cada 2,0 m a partir da observação de poropressão de cravação.

A Figura 3 apresenta um perfil típico de interpretação da vertical de CPTu que contemplou a ocorrência do solo residual jovem (saprólito), o solo residual maduro e o solo mole. Na figura são apresentados os parâmetros clássicos obtidos pelo ensaio (resistência de ponta corrigida - q_t, atrito lateral - f_s, e poropressões u_2 e u_0), assim como os parâmetros normalizados (atrito lateral - F_r e parâmetro de poropressão - B_q), conforme as Equações 1 e 2 propostas por Robertson [5]. Destaca-se que, para a correção da resistência de ponta (q_c) em resistência de ponta corrigida (q_t), foi adotado o valor da constante “a” conforme indicado no certificado de calibração do cone (a = 0,8201).

$$F_r = \frac{fs}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (1)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (2)$$

Sendo:
fs – atrito lateral;
q_t – resistência de ponta corrigida ($q_t = q_c + u_2 \times (1 - a)$);
σ_{v0} - tensão vertical efetiva;
u_2 - poropressão medida no cone; e
u_0 – poropressão de equilíbrio.

De forma complementar, também são apresentados os ensaios de dissipação realizados em profundidade em cada um dos materiais, indicando o ponto de início do ensaio ($u_{0\%}$) e o final da dissipação ($u_{100\%}$). Para estimativa do estado de tensões efetivo (σ'_{v0}), as poropressões de equilíbrio obtidas pelos ensaios de dissipação foram interpoladas em profundidade, gerando uma reta sobreposta à poropressão hidrostática.

Como pode ser observado na Figura 3, o solo mole apresenta a menor resistência de ponta, com valores da ordem de 2.000 kPa e que ocorrem de forma dispersa dentro da matriz do material. O solo residual possui maior competência e apresenta valores

de resistência de ponta de aproximadamente 4.000 kPa, majoritariamente. Por fim, o saprólito de filito dolomítico ocorre em maiores profundidades, chegando a apresentar resistência de ponta superior a 10.000 kPa, o que é compatível com o seu o menor grau de alteração. Cabe destacar que o ensaio foi finalizado em profundidade anterior a especificada em projeto tendo em vista a alta resistência do saprólito.

Quanto aos parâmetros normalizados, nota-se que o B_q do solo residual mole chega a valores superiores a 0,40 em profundidade, sendo estes ligeiramente superiores aos do solo residual, o qual apresenta valores da ordem de 0,30. Quanto ao saprólito, os valores observados tendem a zero, conforme esperado para um material de alta resistência. Já o parâmetro F_r não apresentou variações significativas em profundidade, não sendo possível utilizar tal índice na avaliação dos litotipos. Os valores observados são clássicos de solos de natureza siltosa a argilosa, fato o qual foi corroborado pelos ensaios de caracterização detalhados no item 3.1.

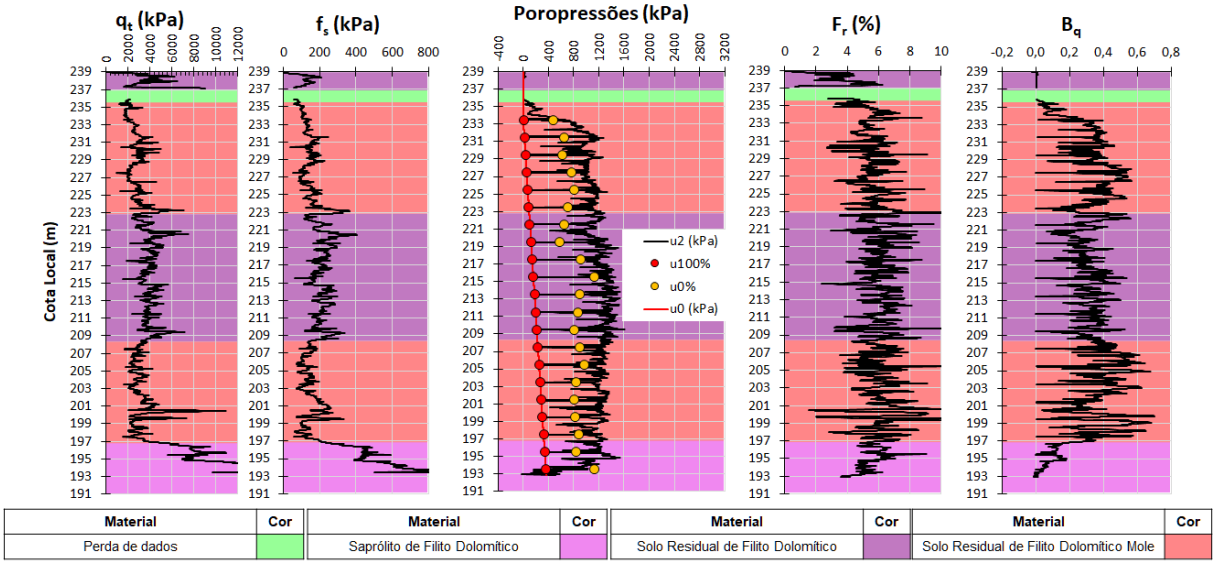


Figura 3 – Perfil típico do ensaio CPTu em materiais de alterações do filito dolomítico (saprólito, solo residual e solo residual mole).

Após a interpretação de todos os ensaios de CPTu, os valores de q_t foram agrupados e analisados estatisticamente, com o objetivo de observar as diferenças entre os solos de alteração de filito dolomítico. O resultado da comparação é apresentado na Figura 4, sendo a Figura 4a um histograma e a Figura 4b os *boxplot* com a indicação dos valores médios. Como pode ser observado, o solo mole apresenta o menor q_t, com valor médio da ordem de 2.705 kPa, conforme esperado para o solo de maior alteração. Já o solo residual apresenta q_t médio de 6.750 kPa e o saprólito um valor médio de 14.971 kPa, sendo o maior resultado, o que é compatível com o seu o menor grau de alteração. Dessa forma, a partir da comparação dos dados nota-se que os valores de q_t evidenciaram a tendência de aumento de resistência esperada para os materiais sendo inversamente proporcional ao grau de alteração dos litotipos.

Em complemento, a análise da Figura 4b evidencia uma maior dispersão dos valores de resistência de ponta no saprólito, se comparado ao solo residual e o solo residual mole. Tal comportamento pode ser atribuído à anisotropia imposta pela foliação e pelos planos de fraqueza remanescentes que tendem a intensificar a variabilidade geomecânica do material, resultando em zonas mais competentes e em trechos mais

degradados, ou seja, regiões com menor ou maior grau de alteração que caracterizam a variabilidade do parâmetro mensurado. Analisando o solo residual, nota-se a menor dispersão dos valores, indicando que os processos de intemperismo promoveram uma condição mais homogênea quando comparado ao saprólito. Por fim, para o solo residual mole nota-se a menor dispersão dos valores de q_t, indicando que os baixos valores são caracterizados pelo avançado processo de intemperismo do material.

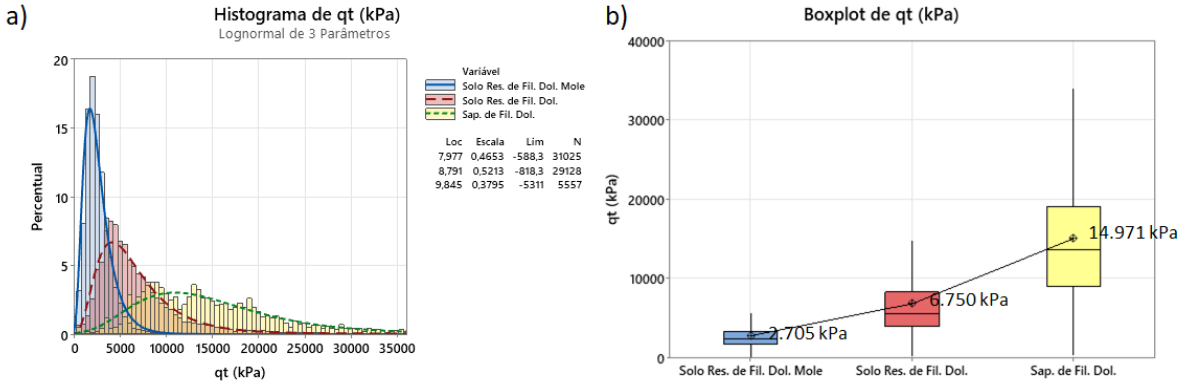


Figura 4 – Comparação dos valores de resistência de ponta: a) histogramas; e b) boxplot com destaque para os valores médios.

A partir da interpretação realizada, os dados obtidos foram plotados no ábaco de classificação de comportamento proposto por Robertson [5]. O resultado é apresentado na Figura 5. Como pode ser observado, de forma geral, os solos de alteração de filito dolomítico apresentaram natureza comportamental de solos siltosos a argilosos. Quanto a resposta dos materiais ao cisalhamento, a Figura 5a indica que o saprólito de filito dolomítico apresentou tendência de comportamento majoritariamente dilatante (88% dos dados). Já a Figura 5b demonstra que o solo residual apresenta comportamento dilatante para o nível de tensões ensaiado através dos ensaios de CPTu (85% dos dados). Por fim, a Figura 5c ilustra que, apesar do comportamento majoritariamente dilatante para o solo mole (78%), este apresentou o maior percentual de dados com comportamento contrátil (22%), quando comparado com os outros materiais. Destaca-se que a avaliação do comportamento tomou como base o parâmetro CD proposto por Robertson [5].

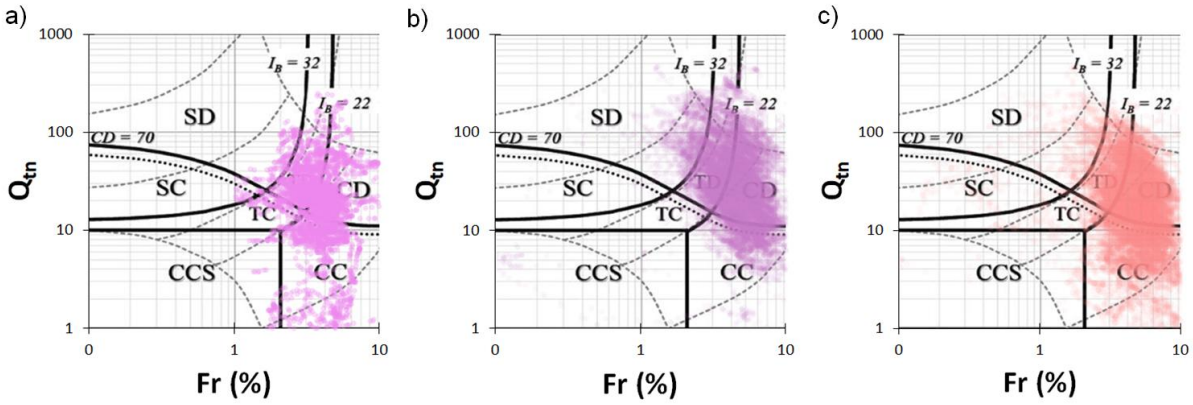


Figura 5 – Comparação do ábaco de comportamento de Robertson [5] para os solos de filito dolomítico: a) saprólito; b) solo residual; e c) solo residual mole.

Cabe destacar que os comportamentos avaliados se referem ao nível de tensão ao qual foram realizados os ensaios, sendo este de aproximadamente 400 kPa, condição anterior ao incremento provocado pela construção da barragem. De forma a complementar essa análise, é apresentado na Figura 6 a avaliação dos dados de q_t e parâmetro B_q do solo mole com a distribuição dos pontos contráteis e dilatantes em função da tensão vertical efetiva. Como pode ser observado, há o aumento da quantidade de pontos contráteis do solo mole e do parâmetro B_q com o aumento da tensão confinante, o que ilustra a importância da correta caracterização da resposta ao cisalhamento do material considerando o nível de tensões que previsto em projeto e não apenas a condição existente do material.

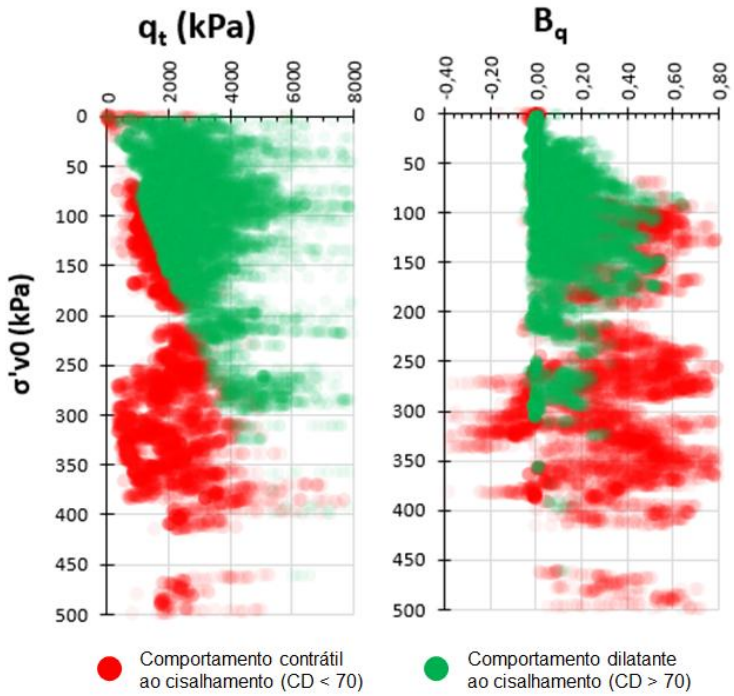


Figura 6 – Avaliação de qt e B_q do solo mole em função da tensão confinante a partir da separação do comportamento contrátil e dilatante segundo Robertson [5].

Dessa forma, os ensaios de campo foram utilizados para a avaliação da abrangência dos materiais e delimitação da ocorrência do solo mole em bolsões, visto que o nível de tensões observado em campo é inferior ao esperado para a barragem. Sendo assim, os parâmetros de resistência foram aferidos a partir de ensaios de laboratório, considerando o nível de tensões esperado para a estrutura.

3. INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

3.1 Ensaios de caracterização

A Figura 7 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização dos solos de alteração de filito dolomítico. Como pode ser observado, não foram verificadas diferenças significativas nas curvas dos ensaios granulométricos, sendo os materiais caracterizados com percentuais semelhantes (passante na #200) da ordem de 90%.

A Tabela 1 apresenta em detalhes os percentuais para cada um dos litotipos. Como pode ser observado, os solos de filito dolomítico apresentam percentual aos de argila sendo de 80% a 100% conforme ASTM D4318-17 [6], independente do grau de

alteração. Quanto à plasticidade dos materiais, nota-se que não há diferenças significativas entre os litotipos, sendo estes classificados de média a baixa plasticidade, considerando a ASTM D4318-17 [7].

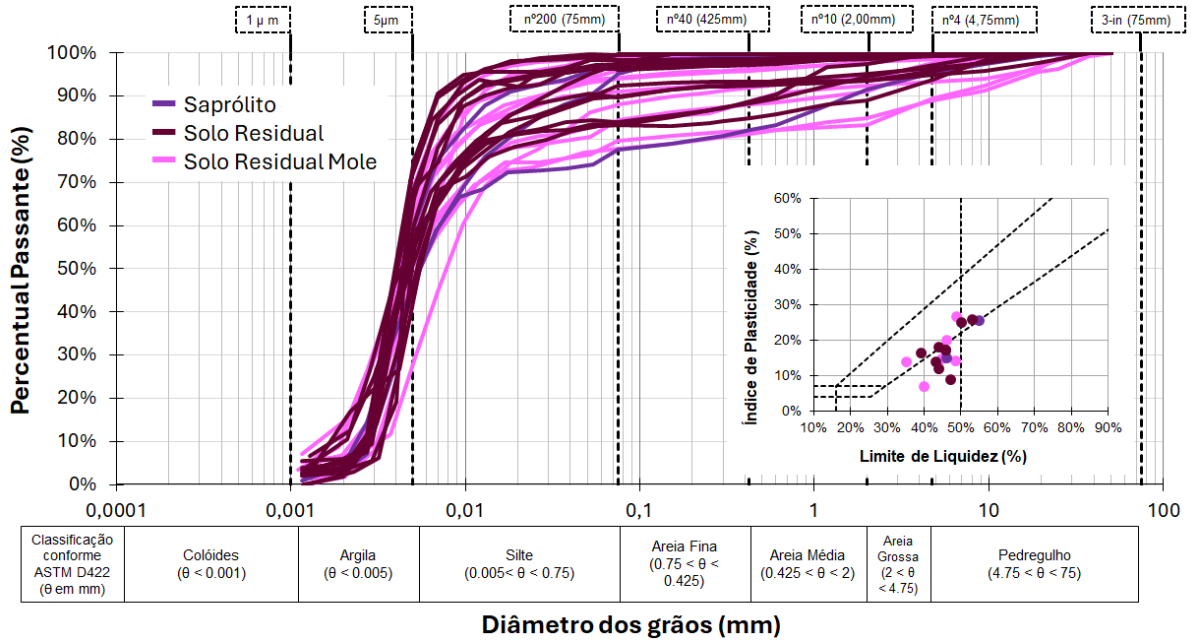


Figura 7 – Ensaios de caracterização dos solos de alteração de filito dolomítico (saprólito, solo residual e solo residual mole).

Tabela 1 - Percentuais médios por faixas granulométricas dos solos de alteração de filito dolomítico.

Material	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho
Saprólito	50,8%	45,6%	2,7%	0,1%	0,6%	0,2%
Solo Residual	49,8%	40,4%	3,0%	1,7%	2,1%	3,0%
Solo Residual Mole	53,6%	37,7%	2,2%	2,1%	1,5%	2,9%

3.2 Ensaios para avaliação da resistência ao cisalhamento

Para a avaliação dos parâmetros de resistência foram coletados blocos nos solos de alteração de filito dolomítico e executados ensaios triaxiais consolidados com ruptura não drenada, conforme a norma americana ASTM D4767-11 [8]. Quanto às tensões de confinamento aplicadas, foram consideradas aquelas equivalentes às tensões previstas em decorrência da construção da barragem. Dessa forma, foram realizados ensaios com tensões confinantes de 100 kPa a 1.600 kPa. Para fins de apresentação dos resultados, foram consideradas as equações indicadas por Ladd [9], sendo:

$$s' = \frac{\sigma'_1+\sigma'_3}{2} \quad (3)$$

$$t = \frac{\sigma_1-\sigma_3}{2} \quad (4)$$

Sendo:
σ_1 – tensão principal maior;
σ_3 – tensão principal menor;

σ_1' – tensão principal maior efetiva; e
σ_3' – tensão principal menor efetiva.

A Figura 8 apresenta o conjunto das trajetórias de tensões dos solos de alteração de filito dolomítico, sendo a Figura 8a correspondentes ao saprólito, a Figura 8b ao solo residual e a Figura 8c ao solo residual mole. Como pode ser observado, para o saprólito de filito dolomítico nota-se um comportamento dilatante ao cisalhamento, especialmente para os menores níveis de tensões. Para os maiores níveis de tensão, observa-se uma redução de tal tendência de comportamento, possivelmente associado à magnitude das poropressões de compressão que são superiores às de cisalhamento, resultando em valores positivos (DAS [10]).

Já para o solo residual (não mole), conforme Figura 8b, nota-se que o litotipo apresenta tendência de comportamento dilatante para os menores níveis de tensões e comportamento majoritariamente contrátil ao cisalhamento para os maiores níveis de tensões. Para o maior nível de tensão (i.e. σ_3 = 1.600 kPa), nota-se ainda uma queda na resistência ao final dos ensaios.

Por fim, para o solo residual mole (Figura 8c), nota-se que, diferente dos demais solos de alteração de filito dolomítico, todas as trajetórias apresentam comportamento contrátil quando cisalhado de forma não drenada, independentemente do nível de tensão aplicado. Além disso, é possível observar a queda de resistência em todos os níveis de tensão confinante, indicando uma possível fragilidade do material.

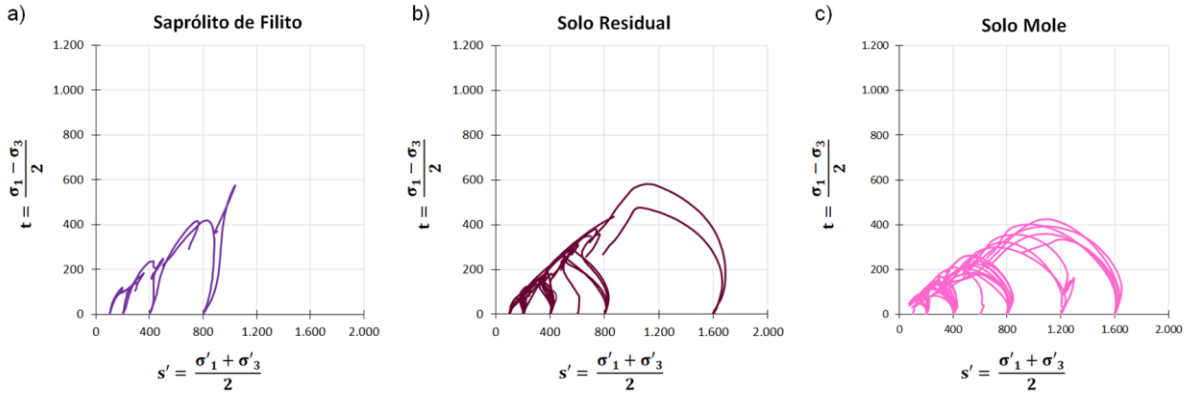


Figura 8 - Trajetórias de tensões não drenadas: a) saprólito; b) solo residual; e c) solo residual mole de filito dolomítico.

A fim de refinar a comparação das resistências entre os solos de alteração de filito dolomítico, na Figura 9 são apresentadas as curvas típicas para cada um dos litotipos, considerando a tensão confinante de 800 kPa. Como pode ser observado, para o saprólito observa-se a maior resistência ao cisalhamento (máxima da ordem de 600 kPa), seguido pelo solo residual com valores da ordem de 400 kPa e, por fim, o solo mole com valores de resistência de aproximadamente 250 kPa. Além disso, é possível notar de forma clara a diferença do comportamento ao cisalhamento dos litotipos, sendo o saprólito com comportamento dilatante, o solo residual com comportamento majoritariamente contrátil e o solo residual mole com alta taxa de geração de poropressão, resultando no comportamento contrátil durante todo o ensaio.

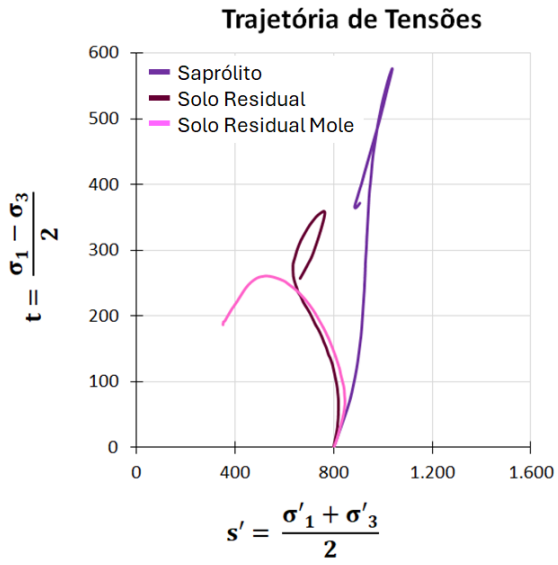


Figura 9 – Comparação das trajetórias de tensões não drenadas para tensão confinante de 800 kPa.

De forma complementar à interpretação dos ensaios e à avaliação da resposta ao cisalhamento, foi realizado o cálculo do parâmetro A de Skempton [11], conforme Equação 5, de modo a comparar a tendência de geração de poropressão de cada um dos solos de alteração de filito dolomítico.

$$A = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_d} \tag{5}$$

O resultado obtido é apresentado na Figura 10, de modo os valores calculados para cada material são apresentados em formato de *boxplot*, tomando como referência o máximo valor observado em cada ensaio não drenado. Como pode ser observado, o solo mole apresentou o maior valor, com média de 2,16, seguido pelo solo residual (A = 0,98) e, por último, o saprólito (A = 0,42). O resultado obtido encontra-se dentro do esperado, uma vez que o solo mole apresenta maior geração de excesso de poropressão normalizado pelos ensaios de campo (B_q), quando comparado com o solo residual e o saprólito (ver Figura 3). Isso, tendo em vista o seu maior grau de alteração geológico.

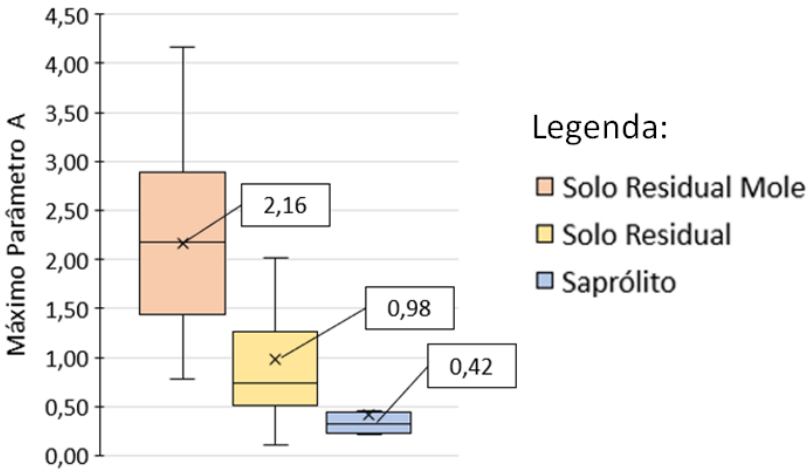


Figura 10 – Comparação do parâmetro A de Skempton [11] do saprólito, solo residual e solo residual mole de filito dolomítico.

Após a avaliação do comportamento ao cisalhamento, os parâmetros de resistência efetivos foram definidos a partir do critério de máxima tensão desvio dos materiais. As trajetórias de tensões efetivas, bem como os pontos adotados na estimativa dos parâmetros são apresentadas na Figura 11.

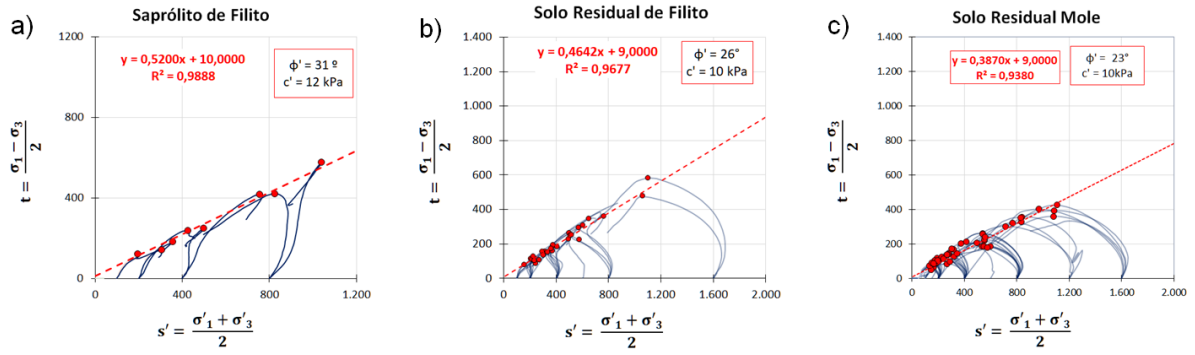


Figura 11 – Estimativa dos parâmetros de resistência efetivos: a) saprólito; b) solo residual; e c) solo residual mole de filito dolomítico.

Para o saprólito foi obtida uma coesão efetiva de 12 kPa (c' = 12 kPa) e um ângulo de atrito de 31º (φ' = 31º). Já para o solo residual foram obtidos os parâmetros de 10 kPa e 26º, respetivamente para a coesão efetiva e para o ângulo de atrito efetivo, sendo estes inferiores aos do saprólito, como esperado. Por fim, para o solo residual mole foi obtida uma coesão efetiva similar à do solo residual (c' = 10 kPa), porém um ângulo de atrito inferior, com o valor de 23º (φ' = 23º).

Tendo em vista que para o solo residual e para o solo residual mole foi observado o comportamento contrátil ao cisalhamento, para estes dois litotipos foram definidos os parâmetros de resistência não drenada ao cisalhamento, conforme indicado na Figura 12. Como pode ser observado, para o solo residual foi adotada a envoltória de Su_0 de 10 kPa com o acréscimo de uma razão de resistência de 0,35 (S_u/σ'_c = 0,35). Já para o solo mole, foi observada uma mudança de envoltória a partir do nível de tensões ao qual o material está submetido: i) para σ'_c < 600 kPa, a envoltória de resistência de Su_0 = 10kPa e S_u/σ'_c = 0,29; e ii) para $\sigma'_c \geq$ 600 kPa, a envoltória de resistência de Su_0 = 50kPa e S_u/σ'_c = 0,21.

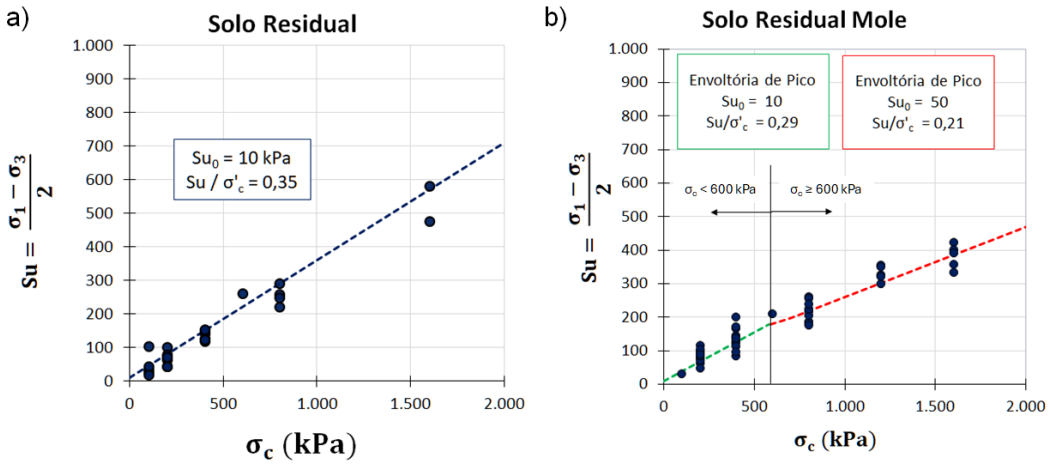


Figura 12 – Estimativa dos parâmetros de resistência não drenados: a) solo residual; e b) solo residual mole de filito dolomítico.

Após a estimativa dos parâmetros não drenados, foi realizada a avaliação do potencial de perda de resistência conforme o Boletim 194 proposto pelo ICOLD [12]. Tal verificação teve por objetivo verificar a possibilidade de perda de resistência dos materiais na condição de cisalhamento não drenado.

3.3 Avaliação da Fragilidade

A metodologia de avaliação da fragilidade proposta no Boletim 194 pelo ICOLD [12] consiste em classificar os materiais em relação a sua fragilidade por meio do parâmetro I_B (*Brittleness Index*), sendo: i) I_B < 20% materiais com baixa fragilidade (não frágil); ii) 20% < I_B < 40% materiais de fragilidade intermediária (moderadamente frágil); e iii) I_B > 40% materiais com alta fragilidade (perda de resistência considerável). Tal parâmetro pode ser calculado segundo a Equação 6, em que τ_p é a resistência de pico do material e τ_r a resistência na condição residual.

$$IB = \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_p} \tag{6}$$

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 13, sendo a Figura 13a o resultado para o solo residual e a Figura 13b o resultado para o solo residual mole. Como pode ser observado, o solo residual apresenta apenas duas curvas (6,0% do total de amostras) com alta fragilidade, sendo as demais distribuídas em fragilidade intermediária (27,3%) e comportamento não frágil (66,7%). Quanto ao solo mole, nota-se que a maioria das amostras apresentou alta fragilidade, sendo 47,9% (22 amostras) com I_B > 40% e 39,1% (18 amostras) dos dados com fragilidade moderada, de modo que apenas 6 amostras (13,0%) apresentaram baixa fragilidade. Possivelmente, o grau de alteração para o solo mole de filito dolomítico foi suficiente para provocar o amolecimento em grandes deformações sob condição de cisalhamento não drenado, o que justifica o comportamento observado.

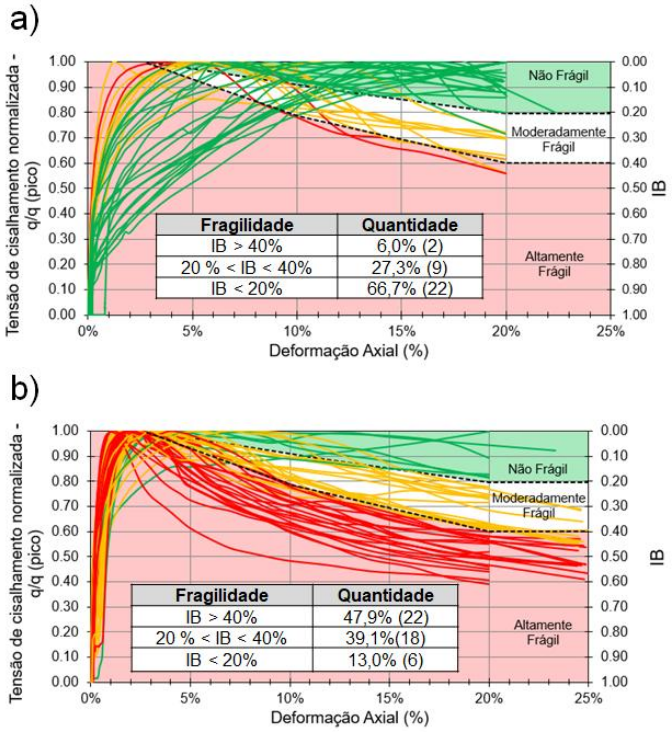


Figura 13 – Avaliação da fragilidade: a) solo residual; b) solo residual mole.

Apesar da fragilidade observada, nota-se que para o solo mole a perda de resistência acontece de forma gradual, com comportamento dúctil, se diferindo dos casos clássicos de liquefação estática apresentados por Olson e Stark [13], bem como aqueles mencionados no ábaco indicado no Boletim 194 (ICOLD [12]). Sendo assim, o modo de falha de liquefação para o solo residual mole não seria aplicável, visto que não há evidência de perda abrupta da resistência do material.

Entretanto, tendo em vista que para o solo residual mole foi observada fragilidade considerável (i.e. I_B > 40%), foram determinados também parâmetros de resistência não drenados para a condição residual. Sendo assim, foi obtida uma razão de resistência de 0,14 (Su/σ'_c = 0,14), com resistência nula a tensão efetiva zero (i.e. $Su_{min} = Su_0$ = 0 kPa), conforme indicado na Figura 14.

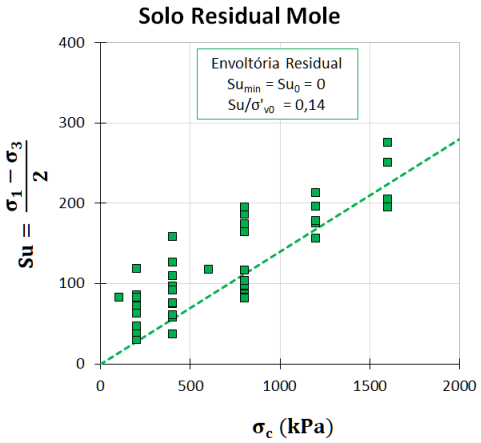


Figura 14 – Definição dos parâmetros de resistência não drenados residuais do solo mole.

3.4 Resumo dos parâmetros de resistência obtidos

A partir do critério adotado para a estimativa dos parâmetros de resistência, é apresentado na Tabela 2 o resumo dos valores obtidos por litotipo. Como pode ser observado, o saprólito apresenta os maiores parâmetros de resistência, visto que apresenta menor alteração da rocha. Já para o solo residual e o solo residual mole, além dos parâmetros efetivos, também foram determinados os parâmetros não drenados, tendo em vista o comportamento contrátil. De forma complementar, nota-se que, quanto maior o grau de alteração do filito dolomítico, menor o parâmetro de resistência, como esperado.

Tabela 2 - Resumo dos parâmetros obtidos para os solos de alteração de filito dolomítico (drenados e não drenados de pico e residuais).

Material	Parâmetros efetivos		Parâmetros não drenados de pico		Parâmetros não drenados residuais
	c' (kPa)	φ' (º)	Su_0 (kPa)	Su/σ'_c	Su/σ'_c
Saprólito	12	31	-	-	-
Solo Residual	10	26	10	0,35	-
Solo Residual Mole	10	23	10 (σ'_c < 600) 50 ($\sigma'_c \geq$ 600)	0,29 (σ'_c < 600) 0,21 ($\sigma'_c \geq$ 600)	0,14

4. CONSIDERAÇÕES EM PROJETOS ACERCA DE SOLOS RESIDUAIS

A partir da observação do comportamento dos solos de alteração de filito dolomítico, foi possível avaliar os critérios de projeto em termos de Fatores de Segurança (F.S.) a serem aplicados para os litotipos em análise. Dessa forma, na Tabela 3 são apresentados os critérios de projeto indicados a partir da análise da NBR 13.028 [14], resolução ANM nº 95 [15] e o Boletim 194, ICOLD [12].

Cabe destacar que para o Solo Residual, conforme indicado pelo ICOLD [12], foi adotado como F.S. para a condição não drenada o valor de 1,30 tendo em vista o comportamento majoritário observado na Figura 13a sendo 66,7% das amostras com $I_B < 20\%$.

Tabela 3 - Critérios de Fatores de Segurança aplicáveis por tipo de comportamento observado por solo de alteração de filito.

Material	**Condição**	**Referência / F.S.**		
		ABNT [14]	ANM [15]	ICOLD [12]
Saprólito	Análise drenada	1,50	1,50	-
Solo Residual	Análise drenada	1,50	1,50	-
	Análise não drenada	1,30	1,30*	1,30
Solo Residual Mole	Análise drenada	1,50	1,50	-
	Análise não drenada de pico	1,30	1,30*	Avaliar análise na condição residual.
	Análise não drenada residual	-	-	1,10

*Nota: no caso de existência de população na Zona de Auto Salvamento (ZAS), a resolução ANM nº 95 [15] indica a necessidade de F.S. ≥ 1,50 para a condição não drenada de pico.

5. CONCLUSÕES

A caracterização dos solos de alteração de filito dolomítico no contexto do Quadrilátero Ferrífero evidenciou a forte influência do grau de intemperismo em suas propriedades geotécnicas. Apesar de apresentarem granulometria e plasticidade semelhantes, os diferentes litotipos (saprólito, solo residual e solo residual mole) mostraram comportamentos geomecânicos distintos, especialmente no que se refere à resistência ao cisalhamento e à geração de poropressão. Nesse sentido, a simples análise baseada em parâmetros de literatura não se mostra suficiente, sendo imprescindível a integração de ensaios de campo e laboratório para a adequada definição do modelo geológico-geotécnico a ser utilizado.

O ensaio de campo do tipo CPTu se mostrou como ferramenta eficaz na identificação da estratigrafia e na delimitação de zonas mais críticas, como a identificação dos bolsões de solo mole. A avaliação da resistência de ponta e dos parâmetros normalizados confirmou a tendência esperada de aumento de resistência com a diminuição do grau de alteração. No entanto, também ficou evidente que o comportamento dos materiais é dependente do nível de tensões atuante, o que limita a aplicação direta dos resultados de campo em análises de estabilidade, reforçando a

necessidade de ensaios laboratoriais representativos das condições de carregamento esperadas para a estrutura.

A análise dos ensaios triaxiais indicou diferenças na resposta ao cisalhamento entre os litotipos. Enquanto o saprólito apresentou comportamento predominantemente dilatante e maior resistência, os solos residuais, especialmente o solo residual mole, exibiram comportamento contrátil sob condições não drenadas, com elevada geração de poropressão e perda de resistência em maiores deformações. A avaliação da fragilidade indicou que o solo residual mole possui potencial significativo de perda de resistência em grandes deformações, ainda que de forma progressiva, o que afasta a ocorrência de liquefação estática, mas reforça a necessidade de análises criteriosas em termos de utilização de parâmetros residuais.

Por fim, os resultados obtidos permitem concluir que a adoção de critérios de projeto diferenciados para cada litotipo é essencial para avaliar a segurança de barragens construídas sobre solos de alteração de filito dolomítico. A consideração de análises drenadas e não drenadas, incluindo a avaliação de resistências residuais para materiais com alta fragilidade, bem como a adoção de fatores de segurança compatíveis com o comportamento dos materiais avaliados, são fundamentais para uma avaliação assertiva das condições de estabilidade em estudos geotécnicos.

6. PALAVRAS-CHAVE

Solos residuais, ensaios de campo, ensaios de laboratório, parâmetros de resistência, fragilidade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] SILVA, R. C., GOMES, T. B. G., EHRLICH, M., & DA COSTA, D. P. (2020). Comportamento de um Maciço em Solo Residual de Filito adjacente a uma Cava de Mineração no Quadrilátero Ferrífero. In XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica–Cobramseg. Campinas/SP: ABMS.

[2] PIMENTEL, J., TEIXEIRA, C. Z., SILVA, F. M., (2005). Geotecnia. In: Projeto APA Sul RMBH., Estudo do Meio Físico. CPRM/SEMAD/CEMIG, 111 p.

[3] AZEVEDO, ÚRSULA RUCHKYS DE; MACHADO, MARIA MÁRCIA MAGELA; CASTRO, PAULO DE TARSO AMORIM; RENGER, FRIEDRICH EWALD; ANDREÁ TREVISOL; BEATO, DÉCIO ANTÔNIO CHAVES. (2012) Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG).

[4] AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS – ASTM D5778-20 (2020): Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils.

[5] P. K ROBERTSON (2016) – “Cone Penetration Test (CPT)-based Soil Behavior Type (SBT) classification system - an update”. Canadian Geotechnical Journal 00: 1‑18 (0000) dx.doi.org/10.1139/cgj-2016-0044.

[6] AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS – ASTM D6913-04e1 (2009): Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis.

[7] AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS – ASTM D4318-17e1 (2018): Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

[8] AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS – ASTM (2020) D4767-11 Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.

[9] LADD, C. C. (1964). Stress-strain behavior of saturated clay and basic strength principles (Vol. 64, No. 17). Soil Mechanics Division, Department of Civil Engineering, MIT.

[10] DAS, B. M. (2019). Advanced soil mechanics. CRC press.

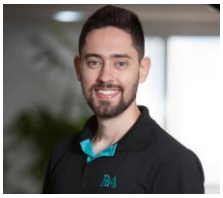
[11] SKEMPTON, A. W. (1954). The pore-pressure coefficients A and B. *Geotechnique*, *4* (4), 143-147.

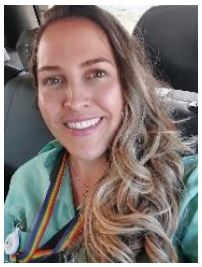
[12] INTERNATIONAL COMMITTEE OF LARGE DAMS – ICOLD (2025) – Bulletin 194 Tailings Dam Safety

[13] OLSON, S. M., & STARK, T. D. (2003). Yield strength ratio and liquefaction analysis of slopes and embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *129*(8), 727-737.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2025) - Mineração - Elaboração, apresentação de projeto e avaliação de segurança de estruturas para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água.

[15] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM (2022) Resolução ANM Nº 95, de 07 de Fevereiro de 2022.

	Guilherme Henrique da Silva PINTO Engenheiro Geotécnico na Pimenta de Ávila Consultoria. Possui Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e Mestrado pelo Programa de Pós-graduação de Engenharia Mineral (PPGEM) da Universidade Federal de Ouro Preto. Tem experiência na área de Geotecnia em projetos de barragens de mineração com ênfase em interpretação de ensaios de campo e laboratório, modelagem numérica e interpretação de instrumentação geotécnica.
	André de Oliveira FARIA Engenheiro Geotécnico na Pimenta de Ávila Consultoria. Possui Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto e Mestrado em Engenharia Geotécnica pelo Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto (NUGEO-UFOP). Tem experiência na área de Geotecnia e trabalha com estruturas de disposição de rejeitos de mineração, considerando o contexto de Engenharia de Registro.

	Aryane Silva CARVALHO Engenheira Geotécnica na Pimenta de Ávila Consultoria. Possui Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Lavras e experiência em modelagem numérica e interpretação de instrumentação geotécnica.
	Caio Felipe Barbosa LACERDA Engenheiro Geotécnico na Pimenta de Ávila Consultoria. Possui Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais. Tem experiência na área de Geotecnia em barragens de mineração com foco em interpretação de ensaios de laboratório, modelagem numérica e interpretação de instrumentação geotécnica.
	Vanessa Luiza THUMS Engenheira Geotécnica na Vale. Possui Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais e Especialização em Barragens pela PUCMG. Possui experiência na gestão de estruturas geotécnicas e em projetos de barragens de mineração com ênfase em interpretação de ensaios de campo e laboratório e interpretação de instrumentação geotécnica.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS
TEMA SR.1
BELÉM – PA, 23 DE SETEMBRO DE 2026

INFLUÊNCIA DE CANALÍCULOS NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DA FUNDAÇÃO DE BARRAGEM - DIQUE 11 – BELO MONTE

Rodrigo de Lima RODRIGUES
Mestre – Itaipu Parquetec

Débora de Oliveira FERNANDES
Mestre – Itaipu Parquetec

Adriana Elisabete LIMBERGER
Mestre – Itaipu Parquetec

Patrícia Casarotto OLIVEIRA
Doutora – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Leandro Carvalho LIMA
Técnico – Norte Energia S.A.

RESUMO

O Complexo Hidrelétrico Belo Monte possui um reservatório formado por 28 diques, construídos sobre solos predominantemente residuais de migmatito, nos quais ocorrem canalículos preenchidos e não preenchidos. Para o monitoramento do fluxo através dos diques, é essencial o conhecimento das condutividades hidráulicas dos materiais da fundação, bem como a compreensão acerca do fluxo nos canalículos preenchidos. Com esse objetivo, neste trabalho foram realizados ensaios de condutividade hidráulica utilizando corpos de prova convencionais e corpos de prova de maiores dimensões, ensaiados em um permeâmetro modificado. Entre os corpos de prova ensaiados, um continha um canalículo centimétrico preenchido, permitindo avaliar o fluxo em condição representativa das heterogeneidades de campo. Essa configuração permitiu avaliar o comportamento do fluxo em condições mais próximas às de campo. Os resultados mostraram que a condutividade hidráulica desse corpo de prova foi superior à observada tanto para horizonte de solo correspondente quanto para o próprio material de preenchimento do canalículo. Esse comportamento sugere a ocorrência de percolação preferencial ao longo da interface entre o canalículo preenchido e o solo adjacente. Tal hipótese foi corroborada durante a abertura do corpo de prova, pela identificação de raízes na região entre o material de preenchimento e o horizonte de solo, evidenciando um caminho preferencial de fluxo. O estudo foi desenvolvido no âmbito do Projeto de P&D ANEEL 07427-0322/2022, financiado pela Norte Energia S.A.

ABSTRACT

The Belo Monte Hydroelectric Complex has a reservoir formed by 28 dikes, built on soils predominantly composed of migmatite residual soils, in which filled and unfilled channels occur. For monitoring flow through the dikes, knowledge of the hydraulic conductivities of the foundation materials is essential, as well as an understanding of flow through the filled channels. To this end, hydraulic conductivity tests were carried out in this study using conventional specimens and larger specimens tested in a modified permeameter. Among the specimens tested, one contained a filled centimetric channel, allowing flow to be evaluated under a condition representative of field heterogeneities. This configuration made it possible to assess flow behavior under conditions closer to those found in the field. The results showed that the hydraulic conductivity of this specimen was higher than that observed both for the corresponding soil horizon and for the channel filling material itself. This behavior suggests the occurrence of preferential seepage along the interface between the filled channel and the adjacent soil. This hypothesis was corroborated during the opening of the specimen by the identification of roots in the region between the filling material and the soil horizon, evidencing a preferential flow path. The study was developed within the scope of ANEEL R&D Project 07427-0322/2022, funded by Norte Energia S.A.

1. INTRODUÇÃO

O Complexo Hidrelétrico de Belo Monte é composto por 28 diques, seis barragens, um vertedouro, duas tomadas d'água e duas casas de força, construídos sobre fundações de natureza variada, incluindo solos residuais de migmatito e maciços rochosos. Durante as escavações iniciais das trincheiras de investigação, foram identificadas áreas com elevada concentração de cavidades tubulares, denominadas canalículos, cujas dimensões variam de milímetros a dezenas de centímetros.

A ocorrência desse tipo de feição é relativamente comum em solos das regiões Norte e Nordeste do Brasil, tendo sido previamente registrada em empreendimentos como as barragens de Vereda Grande, Tucuruí, Samuel e Balbina [1]. Registros internacionais também indicam a presença de canalículos em solos de regiões da Ásia e da África [2][3]. Apesar dessas ocorrências, ainda não há consenso na literatura quanto à gênese dessas estruturas, sendo sua origem e evolução temas de investigação em aberto.

Com o objetivo de investigar e compreender os mecanismos associados à formação e evolução dos canalículos, foi desenvolvido o projeto de pesquisa intitulado *"Modelo de previsibilidade de evolução de canalículos e desenvolvimento de metodologia e software para mitigação dos impactos nas fundações de barragens"* (PD-07427-0322/2022). O projeto, financiado pela Norte Energia S.A. no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), teve como foco ampliar o conhecimento técnico-científico sobre o fenômeno, visando subsidiar estratégias mais eficazes de monitoramento e intervenção.

Como parte desse projeto, foi conduzida uma campanha experimental voltada à caracterização dos materiais e à análise dos mecanismos associados aos canalículos, com ênfase em seu comportamento hidráulico. Os resultados dessa campanha também subsidiaram estudos complementares envolvendo modelagem geológica, simulações numéricas, técnicas de geoestatística e *machine learning*, culminando no desenvolvimento de um modelo de previsibilidade espacial apresentado em [4].

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica realizados no âmbito dessa campanha experimental, bem como discutir sua contribuição para a interpretação do comportamento hidráulico de canalículos preenchidos.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As amostragens e ensaios geotécnicos foram realizados com foco no Dique 11. A fundação desse dique é caracterizada por um perfil composto predominantemente por solos residuais de migmatito, subdivididos em Solo Residual Maduro (SM) e Solo Residual Jovem (SJ), nos quais é recorrente a presença de canalículos — feições que podem influenciar significativamente o regime de percolação na fundação.

Além desses horizontes típicos, investigou-se também a zona de transição entre o SM e o SJ, denominada Solo Residual de Transição (ST), a qual, com base em observações de campo, apresenta indícios de atuação como caminho preferencial de fluxo. Adicionalmente, foram analisados os materiais de preenchimento dos

canalículos identificados ao longo dos três horizontes. Para isso, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas dos quatro materiais (SM, ST, SJ e material de preenchimento), destinadas à realização de ensaios de caracterização e de condutividade hidráulica em laboratório. Complementarmente, foram executados ensaios de permeabilidade *in situ*, bem como o acompanhamento das condições de fluxo durante a escavação de uma trincheira drenante a jusante da estrutura [5].

A análise inicial dos horizontes investigados evidenciou elevada heterogeneidade do maciço, destacando-se a variação de coloração e a presença de concreções, possivelmente associadas a processos de laterização, mais evidentes nos horizontes SM e ST. O horizonte SM apresentou coloração avermelhada, maior presença de concreções e maior resistência à coleta. O ST, por sua vez, caracteriza-se como uma zona intermediária, com atributos transicionais entre o SM e o SJ. Já o SJ apresentou coloração mais clara e menor resistência à amostragem.

Do ponto de vista dos índices de consistência, os horizontes SM e ST apresentaram comportamento semelhante, enquanto o SJ apresentou valores mais elevados de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP). Em termos granulométricos, o SM foi classificado como areia fina argilo-siltosa, o ST como argila areno-siltosa e o SJ como silte argilo-arenoso. A massa específica dos sólidos apresentou baixa variabilidade entre os materiais, com valores típicos de solos finos.

Por fim, a análise de amostras indeformadas indicou que o horizonte SM apresenta menores índices de vazios e porosidade, em concordância com sua menor permeabilidade observada em campo. Em contrapartida, as evidências indicam que o fluxo de água na fundação ocorre predominantemente através dos horizontes ST e SJ, reforçando o papel dessas camadas — e de suas interfaces — no controle do comportamento hidráulico do sistema.

Uma descrição detalhada dos procedimentos de amostragem e dos ensaios de caracterização pode ser encontrada em [6].

3. CANALÍCULOS EM SOLOS RESIDUAIS

Os canalículos observados podem ser classificados em preenchidos e não preenchidos. No caso dos canalículos preenchidos, o material de preenchimento pode apresentar origem orgânica, associada a processos biológicos (atividade radicular ou de fauna), e/ou inorgânica, relacionada a processos de intemperismo e retrabalhamento do solo.

De modo geral, o material de preenchimento apresenta características semelhantes às do solo do perfil adjacente, porém com menor presença de minerais acessórios e ausência significativa de concreções de óxidos e hidróxidos de ferro. Mineralogicamente, observa-se predominância de quartzo em frações finas, além da presença de caulinita e outros argilominerais não completamente identificados nos ensaios realizados. Adicionalmente, verifica-se a ocorrência de matéria orgânica, tanto na forma de restos de raízes ainda estruturadas quanto como material decomposto (húmus). Em alguns casos, também são identificados torrões do solo do entorno incorporados ao preenchimento, caracterizando material reliquiar.

A Figura 1 ilustra exemplos típicos dessas feições, incluindo a abertura de um canalículo não preenchido na superfície e a exposição do perfil de um canalículo preenchido durante escavação.



a) **b)**

Figura 1 - Exemplo de a) canalículo não preenchido - visualizado na superfície; b) canalículo preenchido - visualizado durante uma escavação.

A identificação dos canalículos é mais evidente no horizonte de Solo Residual Maduro (SM), em função do contraste marcante entre os materiais. Nesse horizonte, o solo apresenta coloração avermelhada, maior resistência e presença de concreções, enquanto o material de preenchimento dos canalículos é, em geral, mais claro (acinzentado), menos resistente e texturalmente distinto. Por outro lado, no horizonte de Solo Residual Jovem (SJ), embora se observe uma maior frequência de canalículos, sua identificação visual é dificultada pela menor diferença entre as propriedades dos materiais, uma vez que o SJ apresenta coloração mais clara e menor resistência, aproximando-se das características do material de preenchimento.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Coleta e Preparação de Amostras

Com o objetivo de viabilizar o programa experimental, foi realizada uma campanha inicial de amostragem, na qual foram extraídos seis blocos indeformados, com geometria aproximadamente cúbica e dimensões da ordem de 30 cm de aresta, além de amostras deformadas. As coletas foram realizadas a partir da escavação de uma trincheira na região de jusante do Dique 11. A Figura 2 apresenta o local aproximado da execução da trincheira e a Figura 3 a sequência executada para extração do bloco.



Figura 2 - Local da realização da trincheira para coleta de amostras.

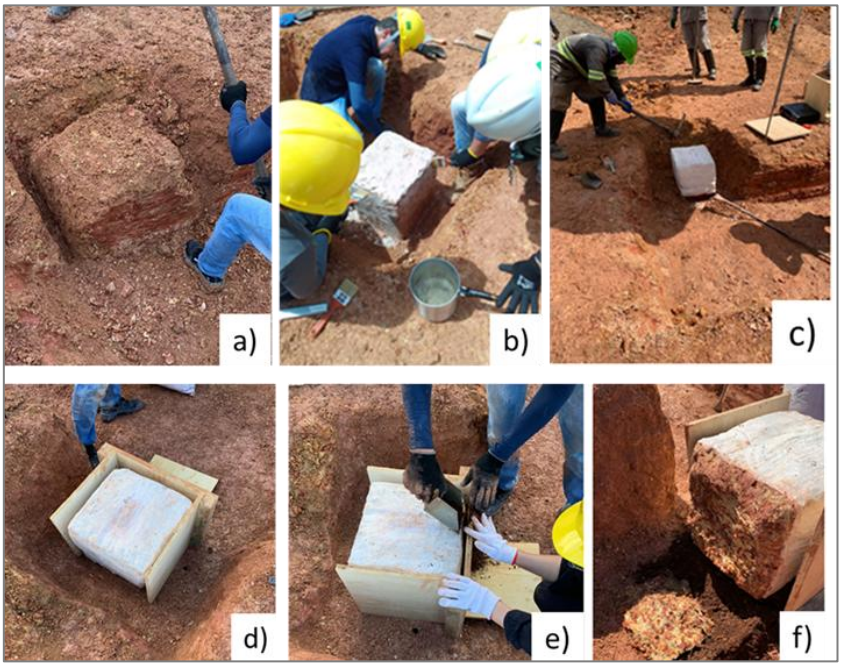


Figura 3 - Sequência executada para extração do bloco: a) Início da escavação; b) parafinagem; c) escavação da base; d, e) preparo para tombamento; f) extração do bloco.

Destaca-se que, no bloco proveniente do Solo Residual Maduro (SM), foi identificada a presença de um canalículo vertical preenchido, contínuo ao longo de toda a altura do bloco e com diâmetro da ordem de centímetros. Esse bloco possibilitou a realização de ensaios representativos do sistema solo–canalículo em conjunto, por meio do uso de permeâmetro modificado.

Posteriormente, durante a execução de ensaios in situ, foram coletadas amostras deformadas dos diferentes horizontes de solo e dos materiais de preenchimento de canalículos, além de amostras indeformadas (CN-Superior e CN-Inferior) de um canalículo de dimensão centimétrica, obtida a partir da trincheira escavada para esses ensaios.

A amostra indeformada foi coletada a partir de um canalículo preenchido identificado na parede da trincheira. Suas dimensões permitiram a extração de duas amostras indeformadas, acondicionadas em tubos de PVC com 76,5 cm de diâmetro e 70 cm

de altura. A Figura 4 apresenta a bancada com o canalículo e o procedimento de extração.



Figura 4 - Procedimento de extração de amostra indeformada de material de preenchimento de canalículo.

4.2 Ensaios de Permeabilidade

A determinação da condutividade hidráulica foi realizada por meio de ensaios de campo e de laboratório, de modo a caracterizar os diferentes horizontes de solo, os materiais de preenchimento dos canalículos e o sistema combinado Solo Residual Maduro (SM) + preenchimento no bloco a qual foi identificado um canalículo preenchido.

Para os materiais avaliados individualmente, foram conduzidos ensaios de permeabilidade em laboratório utilizando equipamentos convencionais e, nos casos do ST e SJ também foram ensaiados no permeâmetro modificado, com dimensões maiores que as convencionais. Já a avaliação do sistema solo–canalículo foi realizada exclusivamente no permeâmetro modificado, permitindo a análise conjunta do comportamento hidráulico dessas feições.

Em campo, a condutividade hidráulica foi determinada por meio de ensaios com permeâmetro Guelph, equipamento de carga constante utilizado para estimativa da condutividade hidráulica saturada *in situ*.

4.2.1 Permeâmetro Tri-Flex

A condutividade hidráulica em laboratório foi determinada utilizando um permeâmetro de paredes flexíveis ELE International Tri-Flex, devidamente montado e calibrado conforme os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D5084.

O equipamento consiste em uma câmara triaxial acoplada a um sistema composto por painel principal, painéis auxiliares, variadores de volume e sistema de aquisição de

dados, permitindo o controle das condições de confinamento e fluxo durante os ensaios.

As amostras indeformadas dos horizontes de solos residuais (SM, ST e SJ) foram saturadas e ensaiadas sob pressões confinantes de 10 e 20 kPa. Para os ensaios conduzidos com gradientes hidráulicos mais elevados (14 e 20), adotou-se exclusivamente a pressão confinante de 20 kPa.

Os corpos de prova representativos dos canalículos foram saturados e submetidos a diferentes gradientes hidráulicos, variando entre 1 e 20. O corpo de prova denominado CN-Superior foi ensaiado sob pressões confinantes de 10 e 20 kPa, enquanto o corpo de prova CN-Inferior foi submetido à pressão confinante de 10 kPa.

4.2.2 Permeâmetro Modificado

Os permeâmetros convencionais preveem condições e metodologias específicas para a determinação da condutividade hidráulica do solo. Porém, para estudos de dispersibilidade de solos, formação de canalículos ou até solos heterogêneos, as normativas (NBR 14545 e NBR 13292) não estabelecem condições de contorno específicas para estes fins.

Neste sentido, foi projetado e construído durante o projeto um permeâmetro modificado para análise de dispersibilidade de solos, que possui dimensões diferentes do que a norma preconiza, possibilita a percolação constante por longos períodos e permite a observação visual do topo e base da amostra a fim de verificar eventuais carreamentos de materiais.

A concepção do equipamento partiu da necessidade de representar, em escala de laboratório, a heterogeneidade observada em campo, em especial as dimensões e a geometria dos canalículos. Nesse contexto, adotou-se um corpo de prova com dimensões superiores às convencionais, limitadas a um diâmetro de 200 mm e altura de 240 mm, de modo a compatibilizar a representatividade do fenômeno com as restrições operacionais de coleta, transporte e moldagem.

O sistema experimental foi instrumentado para monitoramento contínuo da vazão percolada, pressões no topo e na base do corpo de prova, além do registro visual por meio de câmeras. Adicionalmente, foram monitorados parâmetros físico-químicos da água de percolação, incluindo pH, condutividade elétrica, potencial redox, turbidez e concentração de elementos dissolvidos. Considerando a longa duração dos ensaios, foi implementado um sistema de recirculação de água, reduzindo significativamente o consumo durante a operação. A Figura 5 apresenta o aparato montado, assim como o detalhe do permeâmetro desenvolvido para portar a amostra. Cabe destacar que foi solicitado depósito de patente para o equipamento junto ao INPI, sendo que atualmente encontra-se em andamento o processo BR 10 2024 023453 7.

Para a montagem do ensaio, utilizaram-se blocos indeformados previamente coletados, com dimensões médias da ordem de 35 cm de aresta. No caso do Solo Residual Maduro (SM), que apresentava um canalículo preenchido, após a remoção da parafina de proteção, procedeu-se à identificação e centralização dessa feição no corpo de prova. O canalículo apresentava desenvolvimento aproximadamente

vertical, com geometria elíptica na base (eixos da ordem de 80 mm e 120 mm) e seção irregular no topo, com dimensões variando entre 60 mm e 220 mm (Figura 6).

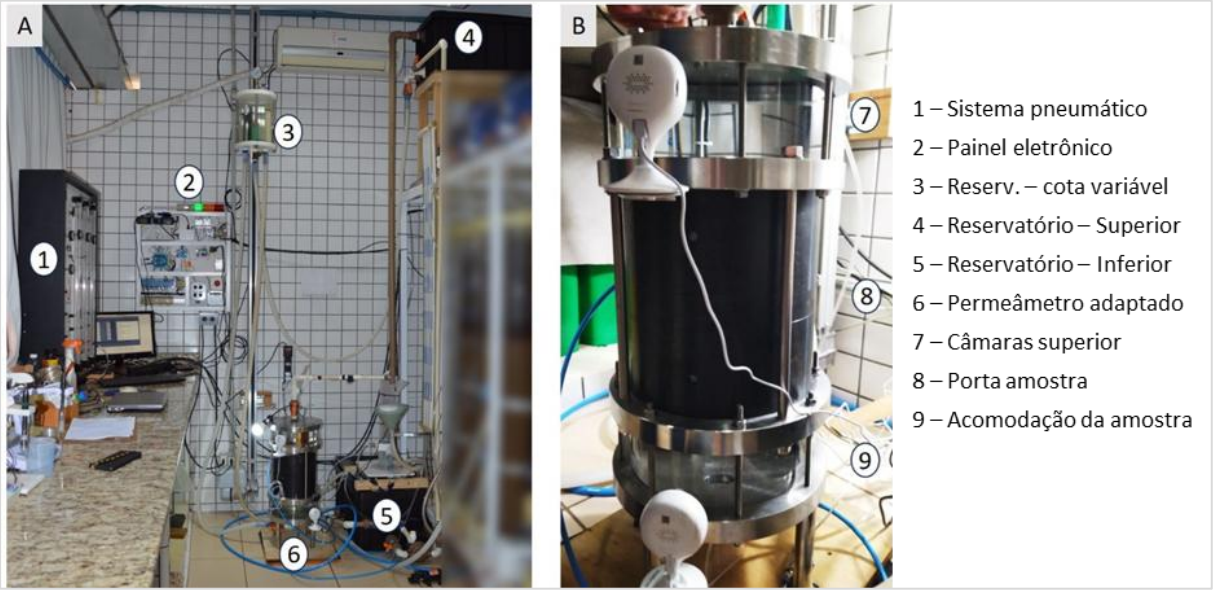


Figura 5 - Permeâmetro modificado montado.

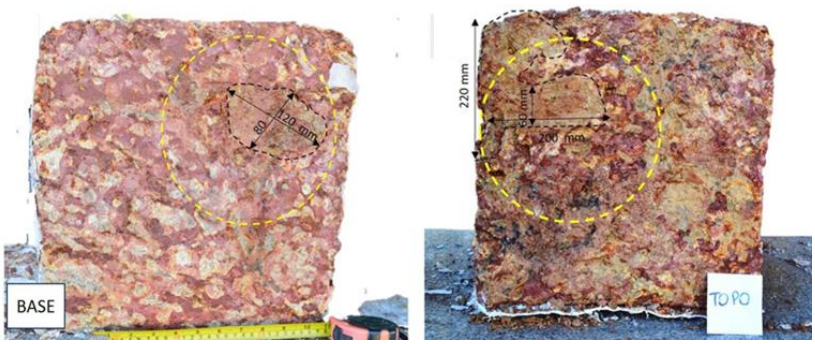


Figura 6 - Identificação do canalículo observado na base e topo do bloco.

A saturação do corpo de prova foi iniciada com carga hidráulica de 50 mm e após 24h aumentada para 100 mm. Após algumas horas do início da saturação foi possível verificar água na parte superior do permeâmetro, quando o volume da câmara foi preenchido manualmente para início dos ensaios.

Na sequência, iniciou-se o monitoramento do fluxo em regime de percolação contínua, com a aplicação de ciclos de carga e descarga hidráulica, sendo a carga máxima aplicada de 1980 mm, correspondente à um gradiente em torno de 6 para os tamanhos de corpo de prova em que estavam sendo executados os ensaios. Ao término dos ensaios, foi aplicado corante azul com o objetivo de identificar possíveis caminhos preferenciais de fluxo, tanto no interior da amostra quanto ao longo de suas interfaces laterais.

4.2.3 Permeâmetro Guelph

A realização de ensaios de condutividade hidráulica *in situ* teve como objetivo obter valores representativos do comportamento hidráulico dos materiais em campo,

permitindo sua análise juntamente com os resultados obtidos em laboratório (Permeâmetro Tri-Flex e permeâmetro modificado).

Em solos com presença de canalículos, ensaios baseados exclusivamente em furos podem introduzir incertezas, uma vez que o processo de perfuração pode provocar o alisamento das paredes e, consequentemente, influenciar os valores de condutividade hidráulica [8]. Ainda assim, optou-se pela utilização do permeâmetro Guelph, por se tratar de um método amplamente consolidado para determinação da condutividade hidráulica de campo.

Para a execução dos ensaios, foi escavada uma trincheira em formato de escada nas proximidades da área previamente utilizada para coleta das amostras indeformadas (Figura 7).



Figura 7 - Local da execução da trincheira para ensaio de permeabilidade *in-situ*.

Os ensaios seguiram a metodologia descrita por [9], iniciando-se com a execução de um furo de aproximadamente 60 mm de diâmetro. Durante essa etapa, foram adotados cuidados para minimizar o amolgamento do solo, incluindo a escarificação das paredes com escova apropriada, visando reduzir efeitos de alisamento e garantir condições mais representativas de fluxo.

Após a preparação do furo, o permeâmetro foi montado e seus reservatórios preenchidos sem introdução de ar no sistema. Em seguida, aplicou-se uma sucção de aproximadamente 20 kPa, por meio de bomba de vácuo, com o objetivo de remover bolhas de ar e estabilizar o fluxo inicial.

O equipamento foi então posicionado e nivelado sobre o furo (Figura 8), iniciando-se o ensaio com altura de carga de 5 cm. Após a estabilização do fluxo em regime permanente, a altura de carga foi elevada para 10 cm, sem interrupção do ensaio, nos casos em que se adotou o método de duas cargas.

O critério de regime permanente foi definido pela obtenção de, no mínimo, três medições consecutivas de vazão com valores constantes. Uma vez atingida essa condição para a(s) altura(s) de carga aplicada(s), o ensaio foi encerrado.



Figura 8 - Permeâmetro Guelph montado em campo.

5. RESULTADOS

Os resultados do programa experimental são apresentados neste capítulo, organizados conforme os métodos de ensaio empregados. Inicialmente, são apresentados os ensaios em permeâmetro Tri-Flex, seguidos pelos resultados do permeâmetro modificado e, por fim, dos ensaios *in situ* com permeâmetro Guelph.

5.1 Permeâmetro Tri-Flex

Os resultados indicaram baixa variabilidade entre os ensaios, com coeficientes de variação predominantemente entre 10 e 15%, sendo os valores obtidos considerados representativos dos materiais avaliados.

A Tabela 1 apresenta a síntese das condutividades hidráulicas obtidas para os solos residuais (SM, ST e SJ) e para os materiais de preenchimento de canalículos (CN-Inferior e CN-Superior), enquanto a Figura 9 ilustra a variação desses valores em função dos gradientes hidráulicos.

Tabela 1 - Síntese das condutividades hidráulicas observadas a partir do ensaio em permeâmetro Tri-Flex.

Gradiente	Solo Residual Maduro (SM)		Solo de Transição (ST)		Solo Residual Jovem (SJ)		CN-Inferior	CN-Superior	
	Conf. 10 kPa (cm/s)	Conf. 20 kPa (cm/s)	Conf. 10 kPa (cm/s)	Conf. 20 kPa (cm/s)	Conf. 10 kPa (cm/s)	Conf. 20 kPa (cm/s)	Conf. 10 kPa (cm/s)	Conf. 10 kPa (cm/s)	Conf. 20 kPa (cm/s)
1	5,86E-05	1,99E-05	1,51E-05	5,92E-05	3,00E-04	3,96E-04	3,56E-05	1,93E-05	8,81E-05
3	3,44E-05	9,98E-06		5,69E-05	1,00E-04		1,68E-04	1,17E-04	9,35E-05
4	3,85E-05	1,97E-05							
5	2,06E-05	1,38E-05	3,84E-05	1,35E-05	1,81E-04	2,36E-04	1,87E-04	1,08E-04	7,34E-05
7	1,65E-05	1,32E-05	3,25E-05	2,02E-05	1,75E-04	2,32E-04	2,29E-04	7,29E-05	6,18E-05
10	5,77E-05	2,24E-05	2,16E-05	2,59E-05	1,97E-04	1,97E-04	3,51E-04	7,94E-05	5,85E-05
14		1,10E-05		3,48E-05		1,44E-04	3,07E-04	6,66E-05	4,81E-05
20		6,54E-06		3,25E-05			2,00E-04	5,03E-05	4,14E-05
Média	**3,77E-05**	**1,46E-05**	**2,69E-05**	**3,47E-05**	**1,91E-04**	**2,41E-04**	**2,11E-04**	**7,34E-05**	**6,64E-05**

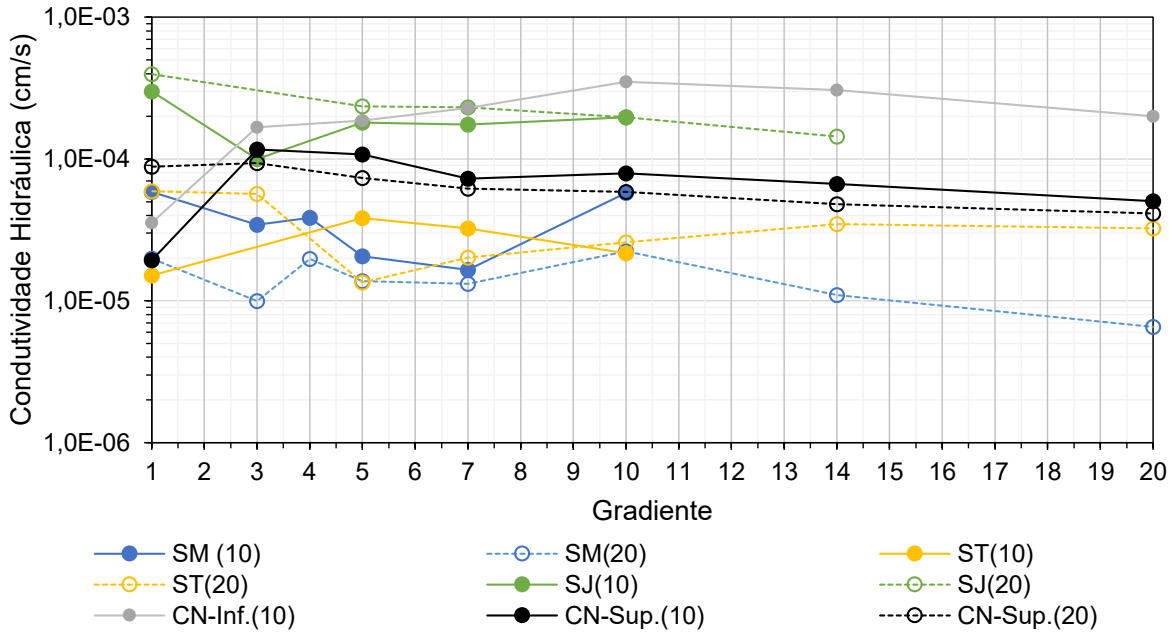


Figura 9 - Valores de condutividade hidráulica de acordo com gradientes.

Os materiais de preenchimento de canalículos apresentaram condutividade hidráulica média da ordem de 10^{-4} cm/s, com comportamento semelhante entre os corpos de prova ensaiados. Para os solos residuais, observaram-se valores da ordem de 10^{-5} cm/s para os horizontes SM e ST, e da ordem de 10^{-4} cm/s para o SJ.

De forma geral, os resultados evidenciam maior permeabilidade associada ao solo residual jovem e aos materiais de preenchimento, em comparação ao solo residual maduro e à zona de transição.

5.2 Permeâmetro Modificado

Os ensaios realizados no permeâmetro modificado evidenciaram evolução progressiva da condutividade hidráulica ao longo dos ciclos de carga e descarga. Nos

três primeiros ciclos, conduzidos em dias consecutivos, observou-se aumento gradual de K, de $2{,}6\times10^{-4}$ para $4{,}8\times10^{-4}$ cm/s, com água de percolação incolor e baixa turbidez (≈0,8 NTU).

No quarto ciclo, foi observado leve turvamento nas câmaras superior e inferior, sem variação significativa da turbidez (≈0,99 NTU), acompanhado de aumento mais pronunciado da condutividade hidráulica (K ≈ $1{,}26\times10^{-3}$ cm/s). No último incremento de carga desse ciclo, verificou-se aumento abrupto da vazão, sem evidência visual de carreamento de partículas, embora tenha sido registrada a liberação de bolhas de ar (Figura 10).



Figura 10 - Câmaras superior com bolhas durante aumento da vazão.

Diante dessa mudança de comportamento, iniciou-se um novo ciclo, no qual foi registrado K ≈ $1{,}75\times10^{-3}$ cm/s, indicando incremento significativo da permeabilidade ao longo do ensaio.

A análise do topo do corpo de prova após os ciclos evidenciou microcanalículos na interface entre o material de preenchimento e o solo residual maduro (SM), que inicialmente se apresentavam pouco desenvolvidos e evoluíram ao longo do ensaio. A aplicação de corante confirmou a ocorrência de fluxo preferencial, concentrado tanto no material de preenchimento quanto nesses microcanalículos de interface (Figura 11). Observações detalhadas evidenciaram a remoção de frações finas e o desenvolvimento de caminhos preferenciais associados à presença de material orgânico, possivelmente raízes.

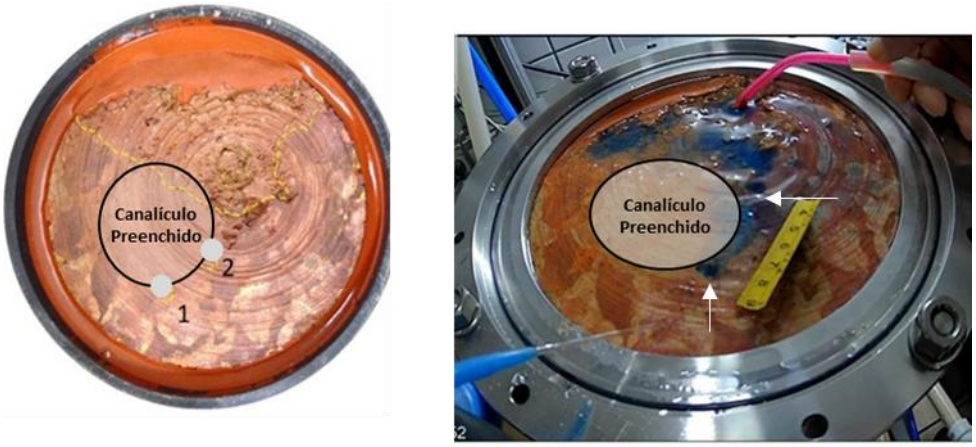


Figura 11 - Topo do corpo de prova antes e após percolação.

De forma geral, os resultados indicam que a percolação promove a evolução de caminhos preferenciais ao longo das interfaces e de estruturas orgânicas, resultando em aumento significativo da condutividade hidráulica do sistema.

5.3 Permeâmetro Guelph

A condutividade hidráulica saturada em campo foi determinada por meio de ensaios com o permeâmetro Guelph, utilizando os métodos de uma e duas alturas de carga, conforme aplicável a cada horizonte.

Nos ensaios realizados no horizonte de Solo Residual Maduro (SM), obteve-se bom desempenho operacional, favorecido pela menor umidade e maior distância em relação ao nível freático. No ensaio SRM1, conduzido com duas alturas de carga (H = 5 cm e 10 cm), o valor da condutividade hidráulica foi de $7{,}71\times10^{-5}$ cm/s. Quando analisadas separadamente, as cargas resultaram em valores de $2{,}51\times10^{-5}$ cm/s (H = 5 cm) e $3{,}84\times10^{-5}$ cm/s (H = 10 cm).

O ensaio SRM2, realizado diretamente em um canalículo presente no horizonte SM, com furo de aproximadamente 10 cm de profundidade e método de uma única altura de carga (H = 5 cm), resultou em uma condutividade hidráulica de $3{,}58\times10^{-5}$ cm/s, valor compatível com aqueles obtidos no ensaio SRM1. Esse resultado sugere que o canalículo ensaiado não apresentava continuidade significativa ou conexão hidráulica em profundidade, não atuando como via preferencial de fluxo no volume investigado. Essa interpretação foi corroborada por inspeção posterior ao ensaio, na qual se verificou que o canalículo possuía extensão limitada, não se prolongando de forma contínua abaixo da região ensaiada. De forma geral, os resultados indicam que a condutividade hidráulica desse horizonte é da ordem de 10^{-5} cm/s.

Para os ensaios realizados nos horizontes de Transição e Jovem, houve bastante dificuldade devido à proximidade com a linha freática. Considera-se que o valor de laboratório é o representativo para esses horizontes, e não o de campo, pois a presença do nível d'água pode ser o motivo para a baixa taxa de infiltração observada, além da instabilidade nas leituras de taxa de mudança de altura de carga, em especial para o caso do horizonte de solo residual jovem.

Para os horizontes de Solo Residual de Transição (ST) e Solo Residual Jovem (SJ), a execução dos ensaios apresentou limitações devido à proximidade do nível freático. Nessas condições, a baixa taxa de infiltração e a instabilidade nas leituras dificultaram a obtenção de regime permanente confiável, especialmente no horizonte SJ.

Dessa forma, considera-se que os valores obtidos em laboratório são mais representativos para esses horizontes, uma vez que as condições de campo podem ter influenciado os resultados, reduzindo artificialmente as estimativas de condutividade hidráulica.

6. DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta a síntese dos resultados de condutividade hidráulica obtidos por meio dos ensaios laboratoriais (permeâmetro Tri-Flex e permeâmetro modificado) e dos ensaios de campo (permeâmetro Guelph).

Tabela 2 - Síntese das condutividades hidráulicas obtidas a partir dos ensaios.

Tipo de Ensaio		Condutividade hidráulica média (cm/s)			
		SM	**ST**	**SJ**	**CN**
Laboratório	**Tri-Flex**	$2{,}34 \times 10^{-5}$	$5{,}31 \times 10^{-5}$	$2{,}17 \times 10^{-4}$	$1{,}17 \times 10^{-4}$
	Perm. Modificado	$1{,}75 \times 10^{-3}$*	2×10^{-4}	$1{,}7 \times 10^{-4}$	-
Campo	**Guelph**	$4{,}41 \times 10^{-5}$	-	-	-

*Ensaio realizado com corpo de prova de SM com canalículo centimétrico preenchido transpassando a amostra, logo, considerado representativo do conjunto SM-Canalículo.
SM: solo maduro; ST: solo de transição; SJ: solo jovem; CN: material de preenchimento de canalículo.

Quanto à condutividade hidráulica obtida a partir do permeâmetro Tri-Flex, destaca-se a semelhança nos valores de SM e ST e a permeabilidade 10 vezes maior no SJ, indicando que se apresenta como o horizonte mais permeável. Quanto ao ensaio realizado com corpo de prova indeformado de material de preenchimento de canalículo, observou-se que ele possui condutividade hidráulica bastante semelhante ao SJ. Ressalta-se que nos ensaios de caracterização os materiais também apresentaram características semelhantes.

Os ensaios realizados com o permeâmetro Guelph no horizonte SM apresentaram boa consistência, favorecida pelas condições de menor umidade e maior afastamento do nível freático. Os valores obtidos em campo, da ordem de 10^{-5} cm/s, são compatíveis com aqueles determinados em laboratório pelo permeâmetro Tri-Flex, indicando coerência entre as diferentes metodologias para esse horizonte.

Para os ensaios conduzidos no permeâmetro modificado, os resultados obtidos para os horizontes ST e SJ mostraram-se consistentes com aqueles determinados no Tri-Flex, reforçando a confiabilidade do equipamento para a avaliação da condutividade hidráulica.

Entretanto, para o horizonte SM contendo canalículo preenchido, foi observada condutividade hidráulica significativamente superior ($\approx 1{,}75 \times 10^{-3}$ cm/s), excedendo não apenas os valores obtidos para o mesmo horizonte em laboratório e em campo, mas também aqueles determinados para o próprio material de preenchimento dos canalículos nos ensaios em permeâmetro Tri-Flex. Esse resultado indica que o comportamento hidráulico do sistema não é governado exclusivamente pelas propriedades do material de preenchimento, mas principalmente pela interação estrutural entre o canalículo e o solo adjacente, evidenciando a atuação de caminhos preferenciais de fluxo.

A análise pós-ensaio evidenciou o desenvolvimento de microcanalículos na interface entre o material de preenchimento e o solo residual maduro, frequentemente associados à presença de raízes. O mapeamento dessas feições indicou a ocorrência

de trajetórias preferenciais de fluxo ao longo dessa interface, bem como evidências de microfraturamento possivelmente induzido pelo crescimento radicular.

A partir da campanha experimental, observou-se uma clara distinção entre canalículos e microcanalículos. Os canalículos, com diâmetros centimétricos, apresentam geometria predominantemente subvertical, enquanto os microcanalículos possuem dimensões milimétricas e geometria mais irregular ou dendrítica, sendo frequentemente associados à interface entre o preenchimento e o solo adjacente.

Os microcanalículos apresentaram evolução ao longo dos ensaios, caracterizada pelo carreamento de partículas finas e aumento de suas dimensões, reforçando seu papel como elementos ativos na condução de fluxo. Além disso, sua ocorrência não se restringe às paredes dos canalículos principais, sendo também observada em outras regiões do maciço, frequentemente associada à presença de raízes.

Por fim, destaca-se que, embora em campo tenha sido observada a erosão do material de preenchimento de canalículos, com consequente aumento de seu diâmetro, esse comportamento não foi reproduzido nas condições de laboratório, possivelmente em função das limitações de escala e das condições controladas dos ensaios.

7. CONCLUSÕES

O permeâmetro modificado representou um avanço relevante na investigação do comportamento hidráulico de solos com presença de canalículos, ao permitir a realização de ensaios em escala compatível com a heterogeneidade do meio. As dimensões ampliadas do corpo de prova possibilitaram incorporar feições estruturais que não são adequadamente representadas em ensaios normatizados convencionais.

A campanha experimental, integrando ensaios em permeâmetro modificado, Tri-Flex e Guelph, permitiu caracterizar os diferentes materiais e avaliar sua condutividade hidráulica sob distintas condições de ensaio. De modo geral, os resultados apresentaram boa concordância entre si para os materiais analisados individualmente.

Por outro lado, a análise do sistema solo–canalículo evidenciou que a presença dessas feições pode alterar significativamente o comportamento hidráulico, aspecto que não é plenamente captado por ensaios convencionais.

Dessa forma, os resultados obtidos contribuem para o aprimoramento da compreensão da influência dos canalículos nas condições de fluxo em fundações de diques, atendendo ao objetivo proposto de apoiar a interpretação e o monitoramento dessas estruturas.

8. PALAVRAS-CHAVE

Belo Monte, Canalículos, Permeabilidade.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LIMBERGER, ADRIANA E.; BOAVENTURA, MARCELO B., RODRIGUES, RODRIGO DE L.; COSTANTIN FILHO, MARCOS A.; FERNANDES, DÉBORA DE O.; KRAJEWSKI, ERLENE D.; LIMA, LEANDRO C. (2024) – "Ocorrência de Canalículos em Fundações de Barragens da Região Amazônica - Estado Da Arte", XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens.

[2] CHRAIBI, A.F., SCHLEISS, A.J., TOURNIER, JP. (2020) – "Failure of Saddle Dam, Xe-Pian Xe-Namnoy Project: Executive Summary. In: Zhang, JM., Zhang, L., Wang, R. (eds) Dam Breach Modelling and Risk Disposal", ICED 2020. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46351-9_2.

[3] TOURNIER, J., CHRAIBI, A. F., SCHLEISS, A.J. (2021) – "Lessons Learnt From The Saddle D Failure of Xe-Pian Xe-Namnoy Project in Laos PDR", Comission Internationale Des Grandes Barrages, Q.105, Marseille.

[4] SILVA, E.J., et. al. (2026) – "An Integrated Geostatistical–Machine Learning Framework for Predicting Resurgence and Canaliculi in the Belo Monte Hydropower Dikes Using Borehole Datat", Revista Brasileira de Geomorfologia, v.27, n.1; e2752; DOI: http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v27i1.2752.

[5] BOAVENTURA, M.B., et. al. (2025) – "Occurrence of Canaliculi and Treatments in the Foundations of the Belo Monte Hydroelectric Complex During Construction and Operation", Fifht International Dam World Conference – Damworld 2025, Lisboa.

[6] RODRIGUES, R.L., et.al. (2024) – "Caracterização geotécnica de um perfil de solo residual amazônico com presença de canalículos", XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Cobramseg 2024, Balneário Camboriú.

[7] OLIVEIRA, P.C., et.al. (2024) – "Aplicação de borracha de silicone líquida como elemento de vedação em ensaios de permeabilidade de solos argilosos utilizando permeâmetro", XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Cobramseg 2024, Balneário Camboriú.

[8] CHRAIBI, A.F., NOMBRE, A., RIHI, S. (2022) – "Rehabilitation of the Operating Comoe Dam Lateritic Foudation", Comission Internationale des Grandes Barrages, Q.105 – R.32, Marseille.

[9] SOTO, M.A.A., (1999) - Estudo da condutividade hidráulica em solos não saturados. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

	**Rodrigo de Lima RODRIGUES** Engenheiro Civil formado pelo Centro Universitário Dinâmica das Cataratas (2014), mestre em Engenharia Civil (Geotecnia) pela PUC-Rio (2017) e especialista em Segurança de Barragens pela UFBA (2019). Possui experiência em análises geotécnicas, instrumentação e sistema de monitoramento.
	**Débora de Oliveira Fernandes** Geóloga (UFPR, 2001), mestre em Geotecnia (USP, 2003), pós-graduada em Segurança de Barragens (UFBA, 2015), doutorado em Geotecnia - em andamento (USP). Colaboradora do Ceasb no Itaipu Parquetec. Atua na área de geologia, geotecnia e treinamentos.
	**Adriana Elisabete Limberger** Engenheira Civil (UTFPR, 2015) e mestre em Engenharia Civil (UNILA, 2022). Colaboradora do Ceasb no Itaipu Parquetec, onde atua com modelagem geológico-geotécnica e simulações numéricas computacionais.
	**Patrícia Casarotto Oliveira** Engenheira Civil (UNIOESTE, 2009), mestre (USP-EESC, 2012) e doutora em Geotecnia (USP-EESC, 2025). Professora do curso de Engenharia Civil na UTFPR, Campus de Toledo. Possui experiência em alterabilidade de rochas e ensaios de laboratório em geotecnia.
	**Leandro Lima CARVALHO** Técnico em Mineração formado pelo Sistema Organizacional Técnico Regular – SOTER (2009). Possui experiência em controle de qualidade de construção de barragens, diques e eclusas (Tucuruí-PA – 2016) nas áreas de Geotecnia e Geologia. Atua na Norte Energia S.A. como Técnico Especialista em Segurança de Barragens.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS
TEMA SR.1
BELÉM – PA, 23 DE SETEMBRO DE 2026

MODELO DE CAMPO DE FASE PARA FRATURAS PRESSURIZADAS APLICADO A PROBLEMAS DE ENGENHARIA DE BARRAGENS

Eduarda Marques FERREIRA
D. Sc – Universidade Federal de Minas Gerais

Saulo Silvestre DE CASTRO
M. Sc - Universidade Federal de Minas Gerais

Hugo Mouro LEÃO
M. Sc - Universidade Federal de Minas Gerais

Roque Luiz da Silva PITANGUEIRA
D. Sc – Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

O modelo de campo de fase para o estudo de fraturas tem se consolidado, nas últimas décadas, como uma abordagem promissora, devido à sua formulação variacional robusta e à capacidade de representar trajetórias complexas de fratura, como nucleação, bifurcação e coalescência de trincas, sem a necessidade de conhecimento prévio sobre seu percurso ou critérios explícitos de propagação. Esses modelos mostram-se particularmente adequados para problemas envolvendo fraturamento hidráulico, nos quais a pressão do fluido atua como carregamento adicional, estimulando a propagação da trinca. Nesse contexto, a aplicação do modelo ultrapassa o âmbito acadêmico e revela grande potencial na simulação de cenários práticos da engenharia, especialmente em estruturas sujeitas a ações hidráulicas significativas. O presente trabalho apresenta a aplicação de um modelo de campo de fase para fraturas pressurizadas na análise de problemas em barragens. A formulação incorpora explicitamente as forças hidráulicas atuantes nas superfícies de fratura, possibilitando a representação de cenários mais realistas e a previsão mais precisa dos padrões de fissuração e dos limites resistentes da estrutura. Como estudo de caso, analisa-se a barragem de Koyna sob a perspectiva do modelo proposto, evidenciando o potencial da abordagem para a investigação de problemas práticos em engenharia de barragens. Toda a implementação e as simulações numéricas foram realizadas no software livre INSANE, desenvolvido na Universidade Federal de Minas Gerais.

ABSTRACT

The phase-field model for fracture investigation has consolidated itself in recent decades as a promising approach, due to its robust variational formulation and its ability to represent complex fracture trajectories, such as crack nucleation,

bifurcation, and coalescence, without requiring prior knowledge of the crack path or explicit propagation criteria. These models prove particularly suitable for problems involving hydraulic fracturing, in which fluid pressure acts as an additional loading, stimulating crack propagation. In this context, the applicability of the model extends beyond the academic sphere and reveals great potential in simulating practical engineering scenarios, especially in structures subjected to significant hydraulic effects. This paper presents the application of a phase-field model for pressurized fractures in the analysis of dam problems. The formulation explicitly incorporates the hydraulic forces acting on the fracture surfaces, enabling the representation of more realistic scenarios and a more accurate prediction of cracking patterns and the structural strength limits. As a case study, the Koyna Dam is analyzed from the perspective of the proposed model, highlighting the approach's potential for investigating practical problems in dam engineering. All implementation and numerical simulations were performed using the open-source software INSANE, developed at the Federal University of Minas Gerais.

1. INTRODUÇÃO

O fraturamento hidráulico caracteriza-se pela presença de fluido no interior do meio, o qual exerce influência direta nos processos de nucleação e propagação de trincas. Esse fenômeno é recorrente em diversas aplicações da engenharia, como na perfuração de poços para extração de petróleo e gás natural, em estruturas sujeitas a ambientes hidráulicos, a exemplo de pontes e barragens, bem como em materiais geológicos nos quais ocorre a percolação de fluidos pelos vazios das rochas. Trata-se, portanto, de um problema de elevada relevância prática, cuja modelagem apresenta significativa complexidade, uma vez que envolve a interação acoplada entre o comportamento mecânico do meio, seus mecanismos de degradação e o escoamento do fluido [1].

Nesse contexto, diferentes abordagens têm sido propostas ao longo das últimas décadas com o objetivo de descrever o fenômeno de fraturamento hidráulico e seus múltiplos aspectos físicos. Dentre essas, destaca-se o modelo de campo de fase, que tem recebido crescente atenção na literatura recente. Tal interesse decorre, sobretudo, de sua capacidade de representar de forma contínua a evolução de descontinuidades, permitindo a simulação de múltiplas fraturas sem a necessidade de critérios explícitos de rastreamento de trincas, além de capturar naturalmente processos como nucleação, coalescência e ramificação.

Diversos estudos têm empregado o modelo de campo de fase na análise de fraturas pressurizadas em diferentes contextos, incluindo meios porosos [2-9], materiais heterogêneos [10-15] e formulações tridimensionais [16,17] e dinâmicas [18,19]. Entre as contribuições relevantes, destaca-se o trabalho de [20], pioneiro na incorporação de efeitos de pressão diretamente na formulação variacional do modelo. Nessa abordagem, a pressão do fluido é considerada como uma carga distribuída que atua no interior da fratura, possibilitando uma descrição mais consistente do acoplamento entre o campo de deslocamentos e o campo de pressão.

Apesar de eficientes na captura de padrões complexos de propagação de trincas, os modelos de campo de fase apresentam elevado custo computacional, principalmente em razão da necessidade de malhas altamente refinadas para representar adequadamente os gradientes do campo de fase. Essa exigência torna-se ainda mais

crítica em modelos de fraturas pressurizadas, nos quais a carga de pressão acompanha a evolução da trinca. Dessa forma, a adoção de abordagens mais abrangentes, capazes de considerar diferentes fenômenos associados à fratura hidráulica, pode inviabilizar a análise de estruturas em escala real.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe o estudo da aplicabilidade do modelo de campo de fase proposto por [20] na modelagem de problemas envolvendo barragens. Para isso, são analisados dois cenários distintos: um modelo em escala real e outro em escala reduzida, com o objetivo de avaliar a capacidade do modelo em representar a propagação da trinca e a resposta estrutural de forma eficiente. Espera-se que a adoção de um modelo que considere a presença da carga de pressão possibilite uma representação mais realista do comportamento da barragem, contribuindo para a identificação de regiões com maior tendência à degradação e, consequentemente, para o planejamento mais adequado de estratégias de monitoramento e manutenção.

2. MODELO DE CAMPO DE FASE PARA FRATURAS PRESSURIZADAS

A utilização de modelos de campo de fase na análise de fraturas é relativamente recente e tem apresentado resultados promissores. Esses modelos permitem superar diversas limitações computacionais da mecânica da fratura clássica, devido às suas características intrínsecas, como a iniciação automática de fissuras, o tratamento de múltiplas fissuras sem restrições quanto à sua geometria ou direção de propagação, além da capacidade de representar fenômenos como bifurcação, nucleação e coalescência de fissuras [21].

Os modelos de campo de fase estão fundamentados na abordagem variacional da fratura frágil, proposta por [22]. Essa formulação baseia-se na ideia clássica introduzida por [23], segundo a qual o estado de equilíbrio de um corpo elástico é obtido pela minimização da energia potencial total do sistema. Nesse contexto, a propagação de fissuras ocorre quando a energia elástica armazenada no corpo excede a energia necessária para a criação de novas superfícies de fratura, a qual é uma propriedade intrínseca do material.

Nesses modelos, a fissura é representada por uma variável escalar, denominada variável de campo de fase ϕ, que assume valor igual a 1 em regiões totalmente fraturadas e 0 no material intacto. Admite-se uma transição suave entre esses extremos, cuja largura é controlada pelo comprimento de escala (l_0), um parâmetro positivo associado ao material. Esse parâmetro assume valores positivos pequenos e regula a difusividade da representação da fissura: no limite em que $l_0 \rightarrow 0$, o modelo converge para a abordagem de fratura localizada, enquanto valores maiores de l_0 resultam em uma representação mais difusa da fissura.

A formulação variacional permite extensões capazes de representar diferentes mecanismos de fratura e uma ampla gama de problemas multifísicos, isto é, o acoplamento da fratura com outros fenômenos físicos. Essa flexibilidade tem motivado o uso crescente do método de campo de fase em diversas aplicações de engenharia. Destacam-se, por exemplo, a modelagem de fraturamento hidráulico, aplicada a reservatórios de petróleo e gás natural, a análise de propagação de fissuras em barragens e maciços rochosos, a avaliação de falhas em materiais parcialmente

frágeis como o concreto, bem como problemas envolvendo interação fluido-estrutura e efeitos térmicos em componentes estruturais. No presente trabalho, a abordagem variacional de campo de fase é aplicada ao estudo de problemas de fratura pressurizada, com ênfase na modelagem de situações práticas da engenharia de barragens.

O primeiro trabalho a reportar a aplicação do modelo de campo de fase à fratura pressurizada é o de [20], cujo modelo tem sido amplamente adotado e posteriormente estendido na literatura. Nesse estudo, os autores propõem uma extensão de modelos anteriores para incorporar os efeitos do fluido na fratura, por meio da adição de um termo ao funcional de energia total. Esse termo representa o trabalho realizado pela pressão do fluido atuando nas superfícies da fissura. Ressalta-se que o modelo desconsidera efeitos térmicos e químicos, assume o sólido como impermeável e sem porosidade, considera o fluido incompressível e adota uma pressão constante ao longo da fratura. Entre os principais benefícios do modelo, destaca-se a capacidade de representar múltiplas fissuras, sem restrições de geometria ou trajetória de propagação. Adicionalmente, fenômenos como nucleação, ramificação e interação entre fissuras são captados de forma natural, sem hipóteses adicionais.

A Figura 1 ilustra o problema de fratura difusa, estudado a partir de um modelo de campo de fase, em condições de presença de carga de pressão na superfície da fratura, no qual $\mathcal{B}$ representa a região fraturada do domínio e $\partial\mathcal{B}$ o seu contorno. A transição entre o material intacto e o danificado é regularizada pelo comprimento de escala l_0. Ainda na Figura 1, Ω representa o domínio do problema, com contorno externo $\partial\Omega$, o qual é decomposto em duas partes: $\partial\Omega_D$, onde são impostas condições de Dirichlet (deslocamentos), e $\partial\Omega_N$, onde são impostas condições de Neumann (forças). O detalhe mostra a atuação da pressão do fluido p_f no domínio da fratura, cuja contribuição é ponderada pela variação da variável de campo de fase ($\nabla\phi$), que também define a direção da fissura, conforme proposto por Bourdin et al. (2012).

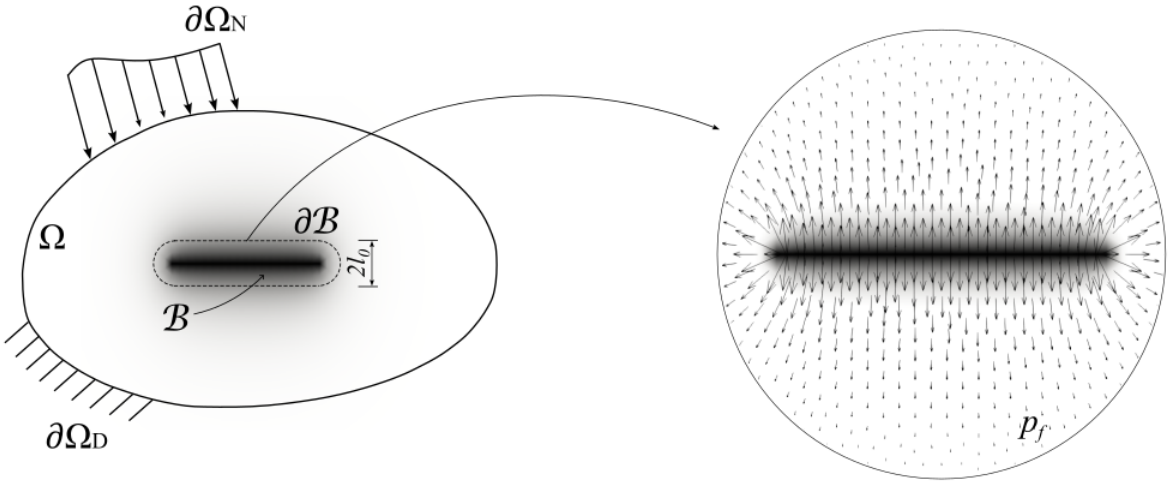


Figura 1 – Meio elástico com fratura de campo de fase pressurizada.

O funcional de energia total E_t para o problema descrito na Fig. 1 pode ser expresso conforme a Equação 1, sendo composto pelas parcelas de energia de deformação, energia de superfície, fontes externas de energia (associadas às forças de corpo b e às forças de superfície t), além da contribuição adicional da carga de pressão.

$$E_t(u,\phi) = \int_\Omega \psi(\varepsilon(u),\phi)dV + \int_\mathcal{B} G_c\gamma(\phi,\nabla\phi)dV - \int_\Omega b\cdot u dV - \int_{\partial\Omega_N} t\cdot u dA + \int_\Omega p_f u\cdot\nabla\phi dV, \quad (1)$$

onde u representa o campo de deslocamentos, ψ a densidade de energia de deformação, ε o tensor de deformações, G_c a energia crítica de fratura e γ a densidade de energia de superfície de fissura.

O campo de deslocamentos u e o campo de fase ϕ são obtidos pela resolução de um problema de minimização associado ao funcional apresentado na Eq. 1, sujeito às restrições de que u seja cinematicamente admissível e ϕ satisfaça o princípio de irreversibilidade da fratura.

Dessa forma, o modelo de campo de fase requer o emprego de um solucionador adequado para a obtenção da solução acoplada das duas variáveis do problema. Dentre as estratégias disponíveis na literatura, adota-se um solucionador alternado do tipo *bound-constrained solver*. Essa escolha justifica-se pela sua eficiência em capturar toda a resposta estrutural, ao reformular o problema de minimização como um problema de otimização a cada passo da análise, além de garantir diretamente a irreversibilidade da fratura. Tal característica é especialmente relevante em problemas de fratura pressurizada, nos quais há a atuação de carregamentos de pressão na região da fissura.

Destaca-se que toda as implementações do modelo de campo de fase para fraturas pressurizadas, bem como as simulações numéricas realizadas, foram desenvolvidas no sistema INSANE (*INteractive Structural ANalysis Environment*), uma ferramenta computacional modular e extensível criada no Departamento de Engenharia Estrutural da Universidade Federal de Minas Gerais. O sistema, de acesso livre e código aberto, contribui para a disseminação dos modelos propostos na comunidade científica, permitindo o uso das implementações existentes e o seu contínuo desenvolvimento. Mais informações estão disponíveis em: https://www.insane.dees.ufmg.br.

3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Nesta seção, são apresentados dois resultados numéricos com o objetivo de ilustrar a aplicação do modelo de campo de fase para fraturas pressurizadas em problemas práticos da engenharia de barragens. O primeiro caso refere-se à modelagem da barragem de Koyna, em escala real, enquanto o segundo considera um modelo de barragem de gravidade na escala 1:40. Ambos os cenários foram selecionados a fim de avaliar a aplicabilidade e a robustez do método proposto. irreversibilidade da fratura. Tal característica é especialmente relevante em problemas de fratura pressurizada, nos quais há a atuação de carregamentos de pressão na região da fissura.

3.1 Barragem de Koyna

Este exemplo investiga o efeito da carga de pressão na barragem de Koyna, uma barragem de gravidade em concreto localizada na Índia e amplamente estudada na literatura, sobretudo em análises dinâmicas; no presente trabalho, contudo, é

considerada sob uma perspetiva estática. Em particular, [24] e [25] analisaram o problema com base em modelos de campo de fase para fratura frágil e fratura coesiva, respetivamente. O presente trabalho adota como referência o estudo de [24], assumindo estado plano de tensão. Ressalta-se, contudo, que o modelo proposto na referência não incorpora a ação da pressão do fluido na fratura.

A configuração do problema é apresentada na Fig. 2(a) e as propriedades do concreto são: módulo de elasticidade $E = 25\ \mathrm{GPa}$, coeficiente de Poisson $\nu = 0.2$, energia crítica de fratura $G_c = 100\ \mathrm{Pa.m}$, densidade do material $\rho_c = 2450\ \mathrm{kg/m^3}$, comprimento de escala $l_0 = 0.3\ \mathrm{m}$. Adicionalmente, adotou-se a aceleração da gravidade $g = 9.81\ \mathrm{m/s^2}$ e a densidade da água $\rho_a = 1000\ \mathrm{kg/m^3}$.

Uma característica dos modelos de campo de fase é a necessidade de empregar malhas com refinamento adequado na região da fratura, de modo a representar corretamente a transição suave do campo de fase nessa região. Para modelos de fratura frágil, [26] recomenda o uso de malhas com $h < l_0/2$. Assim, para o problema em estudo, a malha de elementos finitos deve apresentar tamanho característico de aproximadamente 0.15 m nas regiões onde se espera a propagação da trinca. Essa exigência conduz ao uso de malhas com elevado número de elementos, como a adotada neste trabalho, que possui 62378 elementos triangulares e 31313 nós, conforme ilustrado na Fig. 2(b).

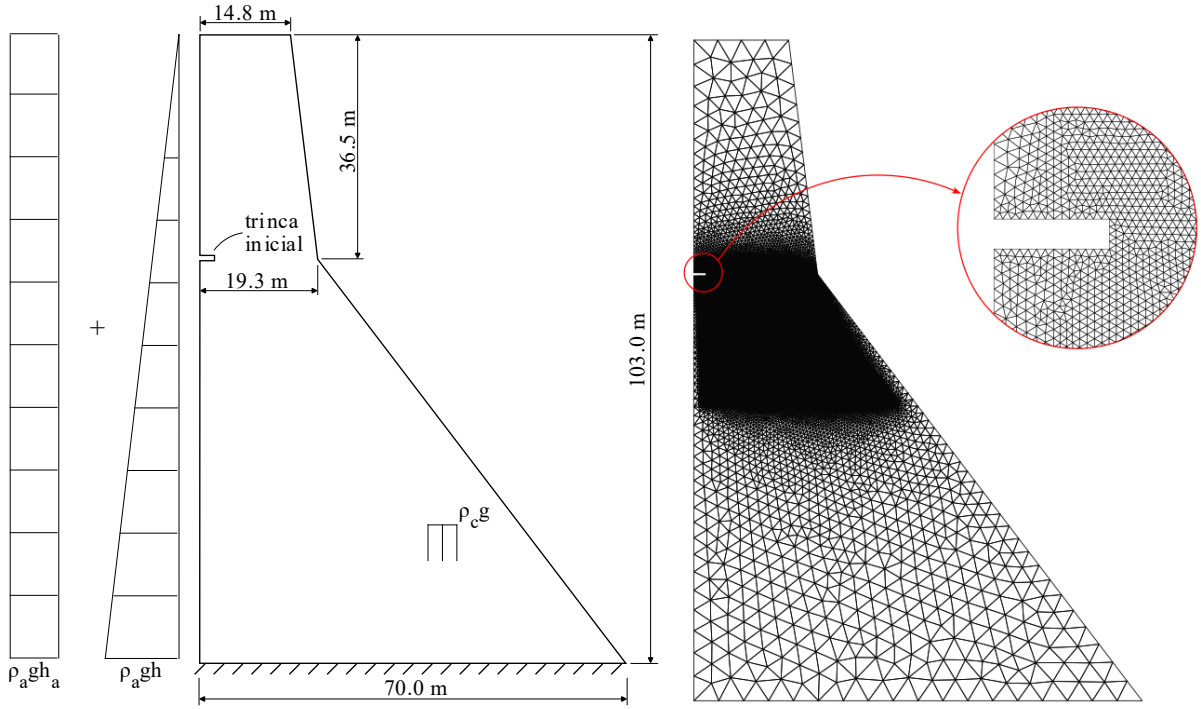


Figura 2 – Barragem de Koyna: (a) Geometria do problema, carregamentos e condições de contorno; (b) Malha de elementos finitos.

A barragem está sujeita a duas cargas constantes: o peso próprio, representado por $\rho_c g$, e a carga hidrostática correspondente ao reservatório cheio, descrita por uma distribuição triangular $\rho_a g h$. Adicionalmente, considera-se uma carga incremental associada ao transbordamento, representada por $\rho_a g h_a$, bem como a pressão atuante

na trinca, com valor $p_f = 9{,}81 \times 10^3$ Pa. Foi utilizado o método de controle direto de deslocamento, que permitiu incrementar o deslocamento na crista da barragem em 5×10^{-4} m por passo de análise, até atingir $0{,}1$ m, valor para o qual é possível observar todo a trajetória de propagação da fissura.

A Figura 3 apresenta a curva de deslocamento da crista em função do transbordamento para a análise realizada, considerando a carga de pressão do fluido atuante na fratura. Ressalta-se que a carga de transbordamento, representada por uma distribuição uniformemente distribuída ao longo da face da barragem, é considerada constante ao longo da altura, conforme ilustrado na Fig. 2(a). Consequentemente, a sua linha de ação não varia com o nível de transbordamento. A grandeza indicada como “transbordamento” no gráfico não corresponde a uma altura física da água; trata-se, na verdade, de um fator de escala aplicado a essa carga distribuída, com o objetivo de atingir o deslocamento controlado prescrito na análise. Observa-se uma boa concordância entre a trajetória obtida e os resultados apresentados por [24], com uma redução significativa do transbordamento quando a carga de pressão é considerada. Esse resultado reforça a importância de modelos que incorporem os efeitos da pressão do fluido, especialmente em aplicações reais envolvendo estruturas sujeitas a ações hidráulicas.

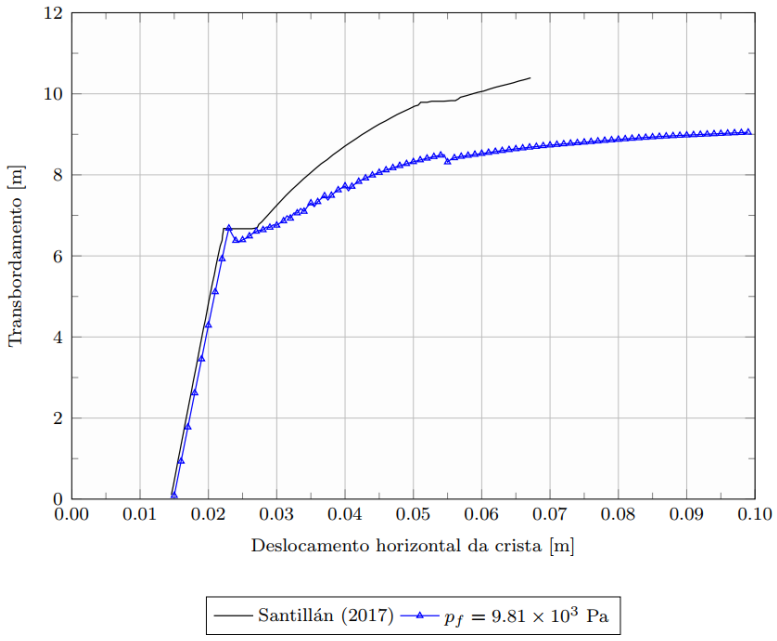


Figura 3 – Resultado da relação entre transbordamento e o deslocamento horizontal da crista da barragem considerando o carregamento de pressão na superfície da trinca, e comparação com a curva apresentada por [24].

Representações da distribuição do campo de fase são apresentadas nas Fig. 4(a)–(d). Este exemplo demonstra a capacidade do modelo empregado em capturar as ramificações da fratura pressurizada sem quaisquer restrições quanto à direção de propagação. Tal comportamento é evidenciado pelo detalhe apresentado na Fig. 5, que exibe uma configuração semelhante à reportada na literatura.

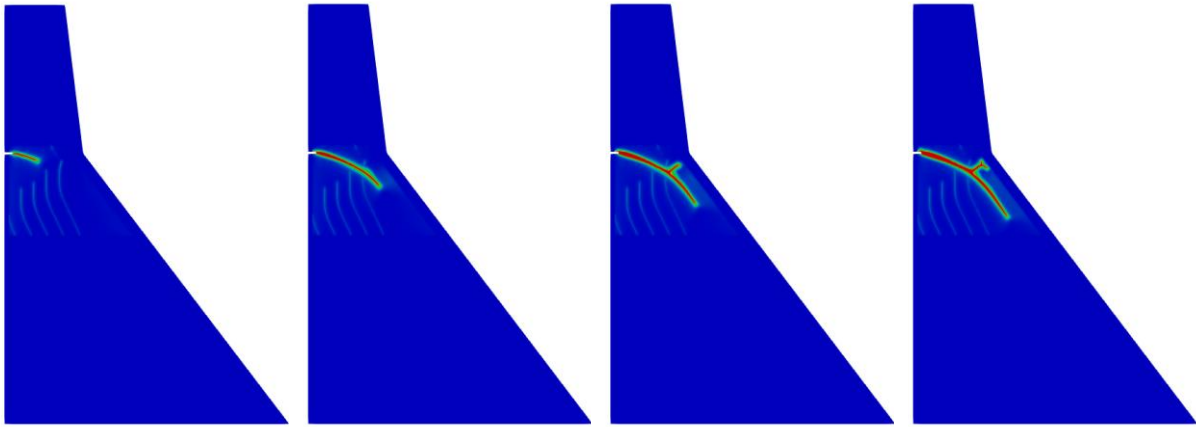


Figura 4 – Distribuição do campo de fase ao longo do modelo para os passos: (a) Passo 50; (b) Passo 100; (c) Passo 150; (d) Passo 200.

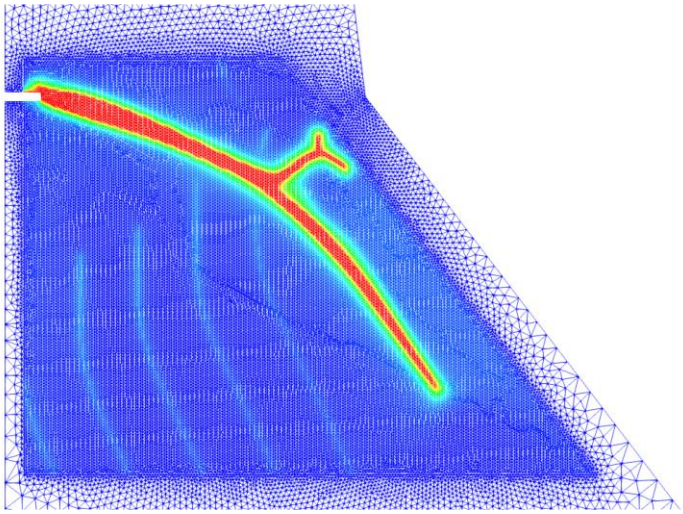


Figura 5 – Detalhe da trajetória da trinca para o passo final da análise.

3.2 Barragem de gravidade em escala reduzida (1:40)

Este exemplo investiga o ensaio de uma barragem de gravidade em modelo reduzido na escala 1:40, estudado experimentalmente por [27] e numericamente por [28] por meio de um modelo de dano contínuo com amolecimento. A configuração do problema é apresentada na Figura 6(a) e inclui uma trinca inicial com comprimento de $15\ \mathrm{cm}$ e espessura de $30\ \mathrm{cm}$.

Uma carga hidrostática é aplicada na face esquerda da barragem, sendo o carregamento triangular equivalente discretizado em quatro cargas concentradas, conforme apresentado na Fig. 6(a). Adicionalmente, considera-se a ação do peso próprio e a carga de pressão com magnitude $p_f = 1.0 \times 10^4\ \mathrm{MPa}$. O deslocamento vertical aplicado ao nó superior esquerdo da abertura da trinca inicial foi controlado por incrementos de $4.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}$ ao longo de 250 passos. Os parâmetros materiais para esse problema são: módulo de elasticidade $E = 3.57 \times 10^{10}\ \mathrm{MPa}$, coeficiente de Poisson $\nu = 0.1$, energia crítica de fratura $G_c = 184\ \mathrm{N/m}$, densidade do material $\rho = 2400\ \mathrm{kg/m^3}$, comprimento de escala $l_0 = 0.02\ \mathrm{m}$. Dessa forma, os elementos da

região onde se espera o aparecimento de fissura possuem tamanho máximo de $h = 0.01\ \mathrm{m}$, levando a uma malha com 18257 elementos triangulares e 9211 nós, conforme apresentado na Fig. 6(b).

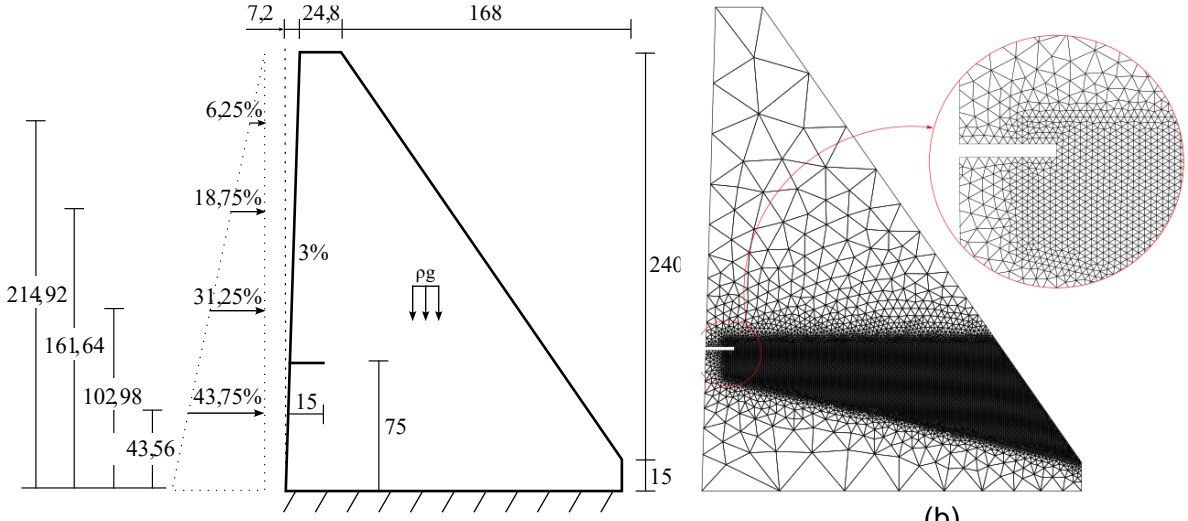


Figura 6 – Barragem de gravidade em escala reduzida: (a) Geometria do problema, carregamentos e condições de contorno (dimensões em centímetros); (b) Malha de elementos finitos.

A Fig. 7 apresenta a evolução da trinca ao longo da análise numérica. Observa-se que o processo de degradação se concentra inicialmente na extremidade da trinca preexistente, propagando-se posteriormente em direção ao lado oposto da barragem. O caminho de propagação apresenta leve curvatura, possivelmente associada à redistribuição do campo de tensões no domínio analisado.

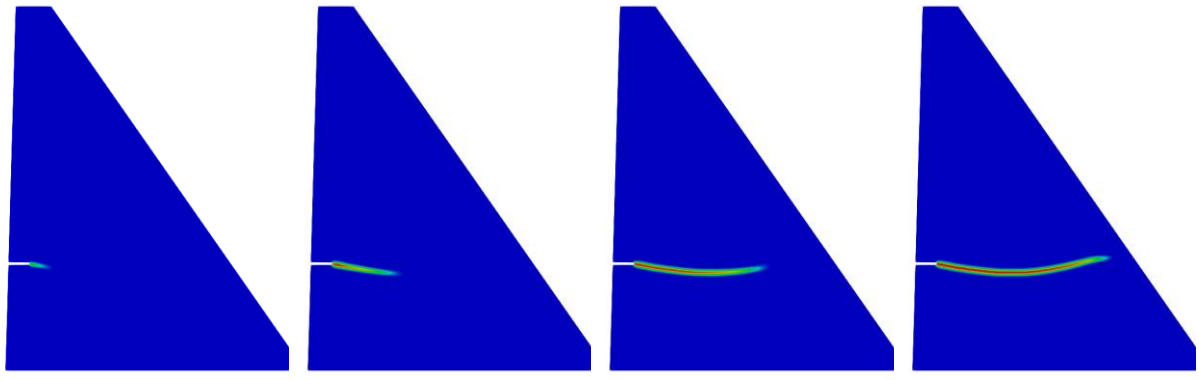


Figura 7 – Distribuição do campo de fase ao longo do modelo para os passos: (a) Passo 30; (b) Passo 40; (c) Passo 100; (d) Passo 250.

A Fig. 8(a) apresenta a comparação entre a trajetória de propagação da trinca obtida no presente estudo e aquelas reportadas na literatura, tanto em análises numéricas quanto em resultados experimentais. Observa-se que a trinca prevista pelo modelo proposto inicia sua trajetória de maneira semelhante às demais referências. Entretanto, à medida que a propagação evolui, sua extremidade tende a se direcionar para regiões superiores da barragem, enquanto os demais estudos registram uma

trajetória descendente. Tal diferença pode ser atribuída à consideração da carga de pressão no presente modelo, condição não contemplada nas demais referências analisadas. Adicionalmente, a Fig. 8(b) apresenta a configuração deformada da barragem no último passo da análise. Observa-se que a deformação obtida é consistente com o padrão de degradação previsto pelo modelo de campo de fase, bem como com as condições de contorno adotadas no problema.

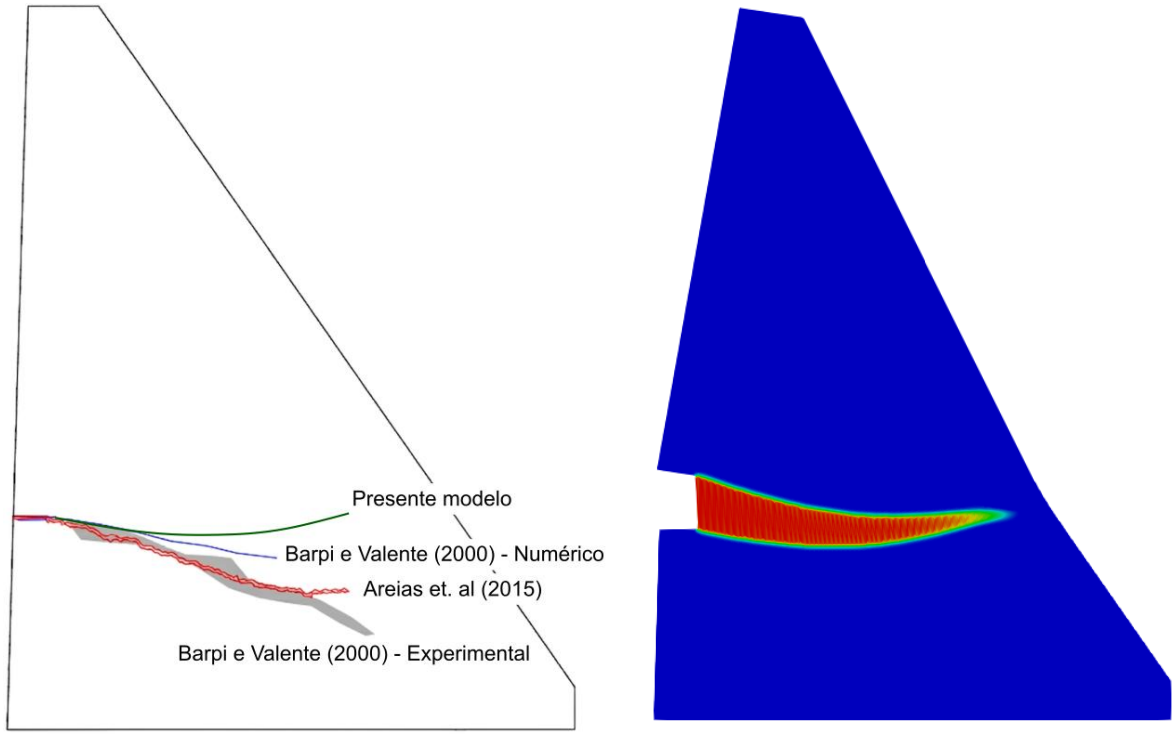


Figura 8 – Resultados de fissuração para o último passo da análise: (a) Comparação da trajetória de fratura obtida com o presente modelo (com carga de pressão) e resultados de referência provenientes de modelos sem carga de pressão; (b) Configuração deformada com distribuição do campo de fase para o presente modelo.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um modelo de campo de fase para o estudo de fraturas pressurizadas, conforme proposto na literatura, aplicando-o a problemas envolvendo barragens, com o objetivo de compreender melhor suas características e avaliar sua aplicabilidade. Foram analisados dois cenários distintos: a barragem de Koyna, em escala real, e uma barragem de gravidade em escala reduzida de 1:40.

O modelo empregado foi capaz de representar adequadamente a propagação da trinca ao longo de toda sua trajetória, incluindo curvaturas e ramificações, características capturadas de forma eficiente pelo modelo de campo de fase, desde que adotado um nível apropriado de refinamento da malha de elementos finitos. Os resultados obtidos evidenciaram ainda a importância da correta representação das condições físicas do problema, considerando todos os mecanismos relevantes envolvidos. No caso da barragem de Koyna, observou-se influência da carga de pressão no nível de transbordamento, enquanto, no exemplo da barragem em modelo

reduzido, verificou-se alteração da trajetória da trinca devido à aplicação dessa mesma condição de carregamento.

De modo geral, os resultados demonstraram que o modelo analisado apresenta potencial promissor para a simulação de fraturas pressurizadas, inclusive em cenários de interesse prático e em estruturas de grande complexidade, como barragens. A abordagem adotada possibilita uma melhor previsão da resposta estrutural e da evolução das zonas degradadas, contribuindo para a identificação de regiões críticas que demandam monitoramento ao longo da vida útil da estrutura.

Por fim, trabalhos futuros podem aprofundar a investigação do problema por meio da adoção de modelos de campo de fase mais robustos, incorporando efeitos adicionais, como o acoplamento hidromecânico e a consideração da poropressão, de modo a ampliar a capacidade preditiva das simulações e sua representatividade física.

5. PALAVRAS-CHAVE

Campo de fase, Fratura hidráulica, Barragens de concreto, Método dos Elementos Finitos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ADACHI, J.; SIEBRITS, E.; PEIRCE, A.; DESROCHES, J. (2007) – “Computer simulation of hydraulic fractures”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 44, n. 5, pp. 739–757.

[2] MIKELIĆ, A.; WHEELER, M. F.; WICK, T. (2015) – “A quasistatic phase field approach to pressurized fractures”, Nonlinearity, v. 28, p. 1371–1399.

[3] MIKELIĆ, A.; WHEELER, M. F.; WICK, T. (2015) – “Phase-field modeling of a fluid-driven fracture in a poroelastic medium”, *Computational Geosciences*, v. 19, n. 6, p. 1171–1195.

[4] LEE, S.; WHEELER, M. F.; WICK, T. (2016) – “Pressure and fluid-driven fracture propagation in porous media using an adaptive finite element phase field model”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 305, p. 111–132.

[5] HEIDER, Y.; MARKERT, B. (2017) – “A phase-field modeling approach of hydraulic fracture in saturated porous media”, *Mechanics Research Communications*, v. 80, p. 38–46.

[6] SANTILLÁN, D.; JUANES, R.; CUETO-FELGUEROSO, L. (2018) – “Phase-field model of hydraulic fracturing in poroelastic media: fracture propagation, arrest and branching under fluid injection and extraction”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 123, n. 3, p. 2127–2155.

[7] YI, L.-P.; WAISMAN, H.; YANG, Z.-Z.; LI, X.-G. (2020) – “A consistent phase field model for hydraulic fracture propagation in poroelastic media”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 372, p. 113396.

[8] SANG, Y.; YI, S.; SHOUYI, W.; YONGJUN, X.; JUNJIE, H.; YITING, W.; LIANGPING, Y.; ZHAOZHONG, Y. (2023) – “Novel phase field model of hydraulic

fracture propagation in poroelastic media and numerical investigation of interaction between hydraulic fracture and natural fracture", *Petroleum*.

[9] YOU, T.; YOSHIOKA, K. (2023) – "On poroelastic strain energy degradation in the variational phase-field models for hydraulic fracture", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 416, p. 116305.

[10] SANTILLÁN, D.; MOSQUERA, J.-C.; CUETO-FELGUEROSO, L. (2017) – "Fluid-driven fracture propagation in heterogeneous medium: probability distributions of fracture trajectories", *Physical Review E*, v. 96, n. 5.

[11] XIA, L.; YVONNET, J.; GHABEZLOO, S. (2017) – "Phase field modeling of hydraulic fracturing with interfacial damage in highly heterogeneous fluid-saturated porous media", *Engineering Fracture Mechanics*, v. 186, p. 158–180.

[12] GUO, J.; LU, Q.; CHEN, H.; WANG, Z.; TANG, X.; CHEN, L. (2018) – "Quantitative phase field modeling of hydraulic fracture branching in heterogeneous formation under anisotropic in-situ stress", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 56, p. 455–471.

[13] GUO, G.; FALL, M. (2019) – "Modelling of preferential gas flow in heterogeneous and saturated bentonite based on phase field method", Computers and Geotechnics, v. 116, p. 103206.

[14] LIU, S. F.; WANG, W.; JIA, Y. et al. (2024) – "Modeling of hydro-mechanical coupled fracture propagation in quasi-brittle rocks using a variational phase-field method", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 57, p. 7079–7101.

[15] SONG, X.; LIU, Y.; YANG, X.; YUAN, H.; FAN, P.; LIU, X. (2024) – "Quantifying the impact of geological and construction factors on hydraulic fracture dynamics in heterogeneous rock layers using the phase field method", *Computers and Geotechnics*, v. 169, p. 106223.

[16] WICK, T.; LEE, S.; WHEELER, M. F. (2015) – "3D phase-field for pressurized fracture propagation in heterogeneous media", in: SCHREFLER, B.; OÑATE, E.; PAPADRAKAKIS, M. (Ed.), *VI International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering*, p. 605–613.

[17] ZHUANG, X.; LI, X.; ZHOU, S. (2023) – "Transverse penny-shaped hydraulic fracture propagation in naturally-layered rocks under stress boundaries: A 3D phase field modeling", *Computers and Geotechnics*, v. 155, p. 105205.

[18] EHLERS, W.; LUO, C. (2017) – "A phase-field approach embedded in the Theory of Porous Media for the description of dynamic hydraulic fracturing", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 315, p. 348–368.

[19] ZHOU, S.; ZHUANG, X.; RABCZUK, T. (2019) – "Phase-field modeling of fluid-driven dynamic cracking in porous media", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 350, p. 169–198.

[20] BOURDIN, B.; CHUKWUDOZIE, C.; YOSHIOKA, K. (2012) – "A variational approach to the numerical simulation of hydraulic fracturing", *Proceedings of the 2012 SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, SPE 146951.

[21] EGGER, A.; PILLAI, U.; AGATHOS, K.; KAKOURIS, E.; CHATZI, E.; ASHCROFT,

I.; TRIANTAFYLLOU, S. (2019) – “Discrete and phase field methods for linear elastic fracture mechanics: A comparative study and state-of-the-art review”, *Applied Sciences*, v. 9, p. 2436.

[22] FRANCFORT, G.; MARIGO, J.-J. (1998) – “Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v. 46, n. 8, p. 1319–1342.

[23] GRIFFITH, A. A. (1921) – “VI. The phenomena of rupture and flow in solids”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, v. 221, n. 582–593, p. 163–198.

[24] SANTILLÁN, D.; MOSQUERA, J.-C.; CUETO-FELGUEROSO, L. (2017) – “Phase-field model for brittle fracture: validation with experimental results and extension to dam engineering problems”, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 178, p. 109–125.

[25] WU, J.-Y.; QIU, J.-F.; NGUYEN, V. P.; MANDAL, T. K.; ZHUANG, L.-J. (2019) – “Computational modeling of localized failure in solids: XFEM vs PF-CZM”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 345, p. 618–643.

[26] MIEHE, C.; WELSCHINGER, F.; HOFACKER, M. (2010) – “Thermodynamically consistent phase-field models of fracture: Variational principles and multi-field FE implementations”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 83, p. 1273–1311.

[27] BARPI, F.; VALENTE, S. (2000) – “Numerical simulation of pre-notched gravity dam models”, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, v. 126, n. 6, p. 611–619.

[28] AREIAS, P.; REINOSO, J.; CAMANHO, P. et al. (2015) – “A constitutive-based element-by-element crack propagation algorithm with local mesh refinement”, Computational Mechanics, v. 56, p. 291–315.

	**Eduarda Marques FERREIRA** Doutora em Engenharia de Estruturas pela UFMG. Mestra em Engenharia Civil pela UFJF. Possui graduação em Engenharia Civil pela UFJF, onde foi monitora de Resistência dos Material, realizou iniciação científica na área de Mecânica da Fratura e atuou como professora substituta nas disciplinas de Análise de Estruturas e Bases para o Dimensionamento de Estruturas. Possui interesse na área de modelagem computacional de materiais parcialmente frágeis.
	**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.
	**Hugo Mouro LEÃO** Atualmente aluno de doutorado em Engenharia de Estruturas da UFMG. Mestre em Engenharia de Estruturas pela Universidade Federal de Minas Gerais. Engenheiro Civil pela UFOP. Foi integrante do grupo Programa de Educação Tutorial em Engenharia Civil da UFOP. Trabalhou como instrutor e monitor de Excel na Fundação Gorceix. Concluiu o ensino médio no Colégio de Aplicação COLUNI - UFV onde era bolsista do CNPq, desenvolvendo projetos de pesquisa na área temática da física.
	**Roque Luiz da Silva PITANGUEIRA** Graduação em Engenharia Civil pela UFBA, mestrado em Engenharia Civil pela PUC-Rio e doutorado em Engenharia Civil pela PUC-Rio. Estágio pós-doutoral na Università degli Studi di Trento (Itália), como Professor Visitante Sênior. Atualmente é Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG. Bolsista de produtividade em Pesquisa do CNPQ, Nível 1C. Idealizador e atual coordenador do INSANE.

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

SEMANA DE BARRAGENS 2026
DAMSWEEK 2026

SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

Cássio Baumgratz Viotti
Engenheiro Geotécnico – MS CE
Consultor
Ex-Presidente do CBDB
Ex-Presidente da ICOLD

SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- A principal dificuldade ao se tratar com estes solos para fins de engenharia é que suas características são muito diferentes daquelas dos solos transportados (Blight, 1997). Além disso, conceitos e metodologias usados na engenharia geotécnica foram desenvolvidos em regiões dominadas por climas temperados (*ICOLD Bulletin 151, 2017*).

Mecânica dos Solos – Karl Terzaghi

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- Karl Terzaghi (1883, Praga – Império Austro-Húngaro / 1963, Winchester - Massachusetts).
- Graduação: Engenheiro Mecânico, TUGraz - 1906. Interesses: Geologia, Engenharia Civil. Tese de doutorado sobre concreto armado, TUGraz – 1912. Período nos Estados Unidos, 1912/1913.
- 1914 Áustria, em seguida (1916) Imperial School of Engineers of Istambul. Após a Primeira Guerra Mundial: Robert College Istambul. Desenvolvimento da ciência da Mecânica dos Solos. ,
- Publicação do Livro, 1925 – Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage.
- Estados Unidos 1925/1929 (M.I.T.), Europa 1929/1938. Estados Unidos (Harvard) 1938 até o final.

Fotos do Terzaghi Book - aparelhos

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

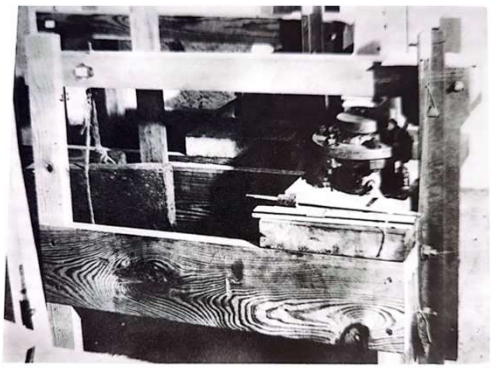
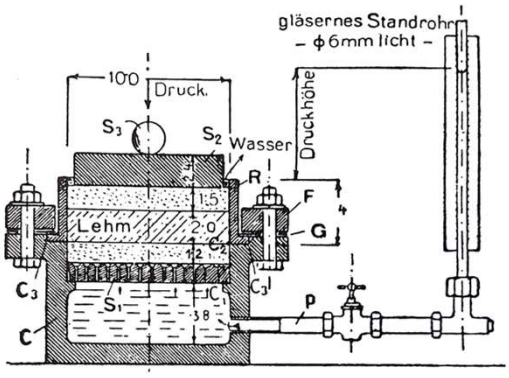


PLATE I. PERMEABILITY AND CONSOLIDATION APPARATUS, ROBERT COLLEGE, 1919.



References

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

1960 / 1999

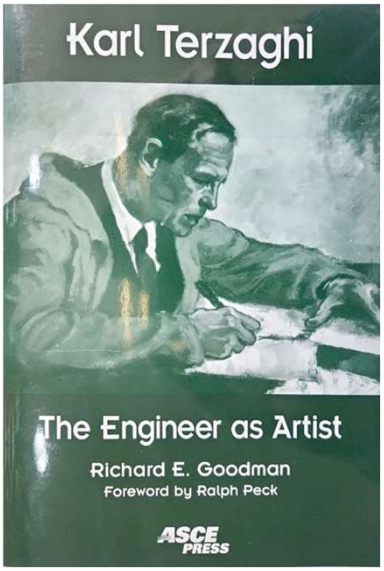
FROM THEORY TO PRACTICE IN SOIL MECHANICS

Selections from the writings of

KARL TERZAGHI

With bibliography and contributions on his life and achievements prepared by

L. BJERRUM
A. CASAGRANDE
R. B. PECK
A. W. SKEMPTON



Significance of Terzaghi's Concept of Effective Stress (text by A. W. Skempton)

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- *Out of the confusion of early attempts to utilize the scientific method in earthwork and foundation engineering*, Terzaghi's work brought order to and made possible the *rational development of a new Science.*
- **The key to this transition proved to be the principle of effective stress**.
- Although this principle is of Paramount importance, its development and implications did not occur at once but over a period of several years and, wholly or in part, in many different publications.

Discovery of Pore Pressures: Modern Soil Mechanics Is Born (text by Arthur Casagrande)

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- From the results of his experiments on clay the basic principles of modern soil mechanics crystalized in 1921. Foremost among these was Terzaghi´s theory of consolidation of clay strata. According to this theory *every load applied on the surface of a clay stratum is at first carried by the pore water contained in the microscopic voids, and then it is gradually transferred onto the grain structure of the clay.*
- In a *paper published in 1923* he presented the basic differential equation for the consolidation process, which makes it possible to compute the rate of settlement of a structure on clay by means of laboratory tests on samples of the clay. This equation also discloses the analogy between the process of clay consolidation and heat transfer. Although this paper *received little attention* when it was published, in retrospect it is clear that *it contained the key which opened the door into a new field of human knowledge*. The first practical application of the theory of consolidation to engineering problems is vividly described in the first part of Terzaghi‘s paper on “Consultants, Clients and Contractors”.

Continuação

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

In 1924 Terzaghi read a paper on the theory of consolidation at the First International Conference on Applied Mechanics in Delft, Holland. This time the response was instantaneous and enthusiastic. After the meeting Forchheimer shook his hand and said to him: “This was the day of your birth into the scientific world.”

In 1925 Terzaghi’s work culminated in the publication of his classic book Erdbaumeckanik auf Bodenphysikalischer Grundlage. This book attracted the attention of John R. Freeman of Rhode Island, the enthusiastic sponsor of engineering sciences. Mr. Freeman bought and distributed a considerable number of copies of the book. At his suggestion, Professor Charles M. Spofford, then head of the department of civil engineering at the Massachusetts Institute of Technology, offered Terzaghi a visiting lectureship there.

Terzaghi no Brazil

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- Escorregamento na Serra do Mar
- Pequeno corte no pé do talude onde estão os condutos forçados da Usina Henry Borden (Cubatão), executado para ampliar a área dos transformadores, resultou em escorregamento de 500.000 m3.
- Terzaghi foi contratado pela Light (Vice-presidente Ackerman) e conseguiu estabilizar o talude com extenso uso de drenagens subterrâneas e superficiais.

Continuação

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- “In March 1947 Karl was off to Brazil for his friend Adolph Ackerman. A landslide had started in a modest rock cut being made to enlarge the transformer station for the Cubatão Powerhouse. Within a few months the slide had enlarged to 600,000 cubic yards, and its headward growth began to undermine the ridge carrying seven high-pressure water lines (“penstocks”) and menaced the power station; this was an extreme emergency.”
- No relatório inicial, Terzaghi escreveu:
- “The ridge which supports the penstocks … seems to consist of deeply weathered but otherwise undisturbed gneiss”.

Continuação

- "Terzaghi proposed to stop the slide with drainage works, first with tunnels and drains along the slides of the moving mass and then, when it had slowed, drilled into the slide mass itself. To find the surface along which the decomposed rock mass was moving he proposed a system that had worked at the Swir powerplant: a shaft driven from atop the landslide mass to below greatest possible depth soon revealed the seat of sliding by offsets in the walls. Similarly, trenches or tunnels were proposed to locate the slide`s sides where continued movement gradually cut them off.
- The slide mass was accurately mapped, and Terzaghi`s drainage works brought it to a halt. Then, to increase the margin of safety, he proposed deep drainage and reinforcement works to improve the factor of safety of the penstock ridge since the effects of the slide might have cracked it decomposed rock. "Once a slide starts, one or more of the seven penstock lines, spanning saddles on top of the ridge, would be lost. The movement of the slide alerted the engineers, and *quick action not only saved the ridge but forced the company to abandon its plans for further developments on the ridge top*.
- After this success, Ackerman`s company, Brazilian Traction, Light and Power (controlled from Toronto, Canada), *retained Terzaghi for their serious problem in attempting to raise Lages reservoir.*

Continuação

- " During his visits for Ackerman, Terzaghi advised on several other demanding projects in Brazil. The list includes Vigario earth dike being constructed with terrible materials, an underground powerhouse in rock, preliminary studies for a subway for São Paulo, slope design for cutting through soils in a limestone quarry, and an iron ore storage yard in clay.
- The São Paulo subway tunnel, Terzaghi advised, would be a difficult venture through saturated fine silty sands. When a much smaller tunnel had been attempted there using compressed air, the air leaked out causing the underground problems to become desperate while the surface subsided.
- He went no further with this job when Ackerman quietly informed Karl he was walking blindly into the midst of a public scandal caused by the questionable integrity of his associates.
- Brazil was a novel territory for Terzaghi where the people and the soils were capable of unexpected behavior."

Barragem Terzaghi (ex-Barragem Vigário) Piraí RJ

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

Bruno NEVES - Consultor/Engenheiro Técnico-Comercial Carpi Group
Alberto SAYÃO - Consultor geotécnico, ex-prof. PUC-Rio

- Diferente dos materiais sedimentares comuns em regiões de clima temperado no hemisfério norte, o solo residual de gnáissico usado na Barragem de Terzaghi exibe características singulares ditadas por seu perfil de intemperismo e gênese pedogenética .
- No estado natural inalterado, o horizonte saprolítico abriga macroporos que conferem condutividade hidráulica elevada ao solo. Contudo, os processos de escavação e compactação destroem essa estrutura reliquiar, transformando o material compactado em um silte arenoso com baixa permeabilidade.
- Karl Terzaghi alertou para a vulnerabilidade técnica desse material, destacando sua *alta compressibilidade e o risco de gerar poropressões elevadas, caso o solo fosse compactado acima da umidade ótima,* em um ambiente de fortes chuvas tropicais.

Continuação

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- A matriz compactada de solo residual tem uma virtude mecânica decisiva: sob condições saturadas e não drenadas, o esqueleto siltoargiloso mobiliza um elevado ângulo de atrito, garantindo estabilidade superior à prevista pelos métodos clássicos.
- Conclui-se que os solos residuais tropicais, quando combinados a robustos sistemas de filtros e drenagem interna, são materiais estruturalmente seguros em longo prazo.
- Apesar das limitações iniciais apontadas e do comportamento peculiar que diferia das teorias tradicionais da época, a matriz tropical remoldada e compactada provou possuir virtude mecânica salvadora, adquirindo ganhos expressivos de resistência ao cisalhamento.

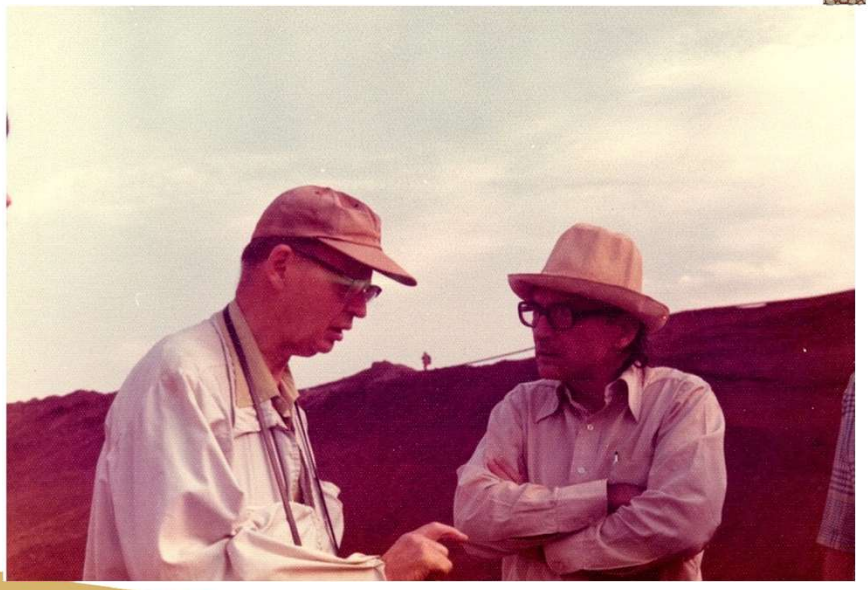
Três Marias

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- Em 1957, iniciou-se a construção da barragem de Três Marias, no trecho mineiro do Rio São Francisco. Ela era de porte e complexidade inéditos no Brasil e um dos principais projetos de barragem no mundo.
- No livro *"Earth and Earth-Rock Dams"* publicado por Sherard e outros em 1963, Três Marias foi destacada e descrita como um exemplo de "an essentially homogeneous clay dam with a central core compacted at a higher water content".
- Neste projeto atuou como consultor ***Arthur Casagrande***, assistente de Terzaghi na Universidade Harvard. Primeira barragem do Brasil onde ele atuou.
- Na ombreira esquerda ocorreu uma fundação bastante complexa, com espessas zonas de colúvios.
- Foi utilizado o método de **Hilf** pela primeira vez no Brasil.

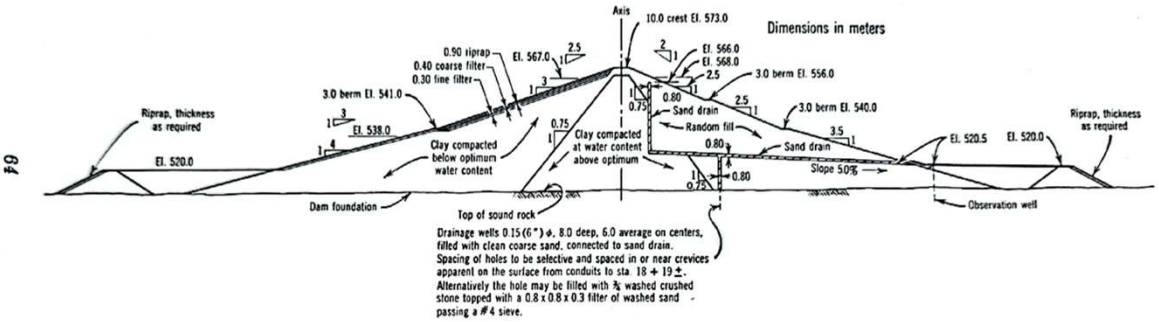
Arthur Casagrande e Victor de Mello

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS



Três Marias - Seção Típica – Sherard book

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS



Três Marias, Brazil.

Fig. 1.2:35 Typical Designs.

Dams of U.S. Consulting Engineers. (Courtesy, International Engineering Co.)

Características do solo poroso

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

Compressible Foundation at Três Marias Dam, Lincoln Queiroz, I Congresso Panamericano de Mec. Solos, Mexico, 1959

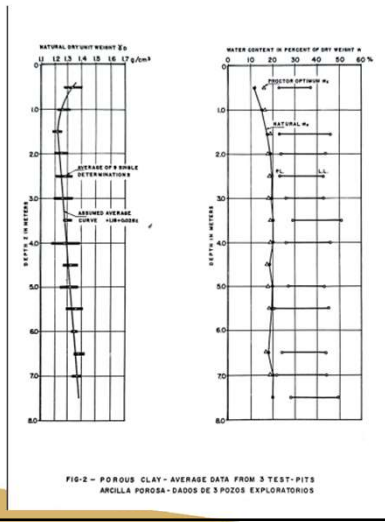


FIG-2 – POROUS CLAY – AVERAGE DATA FROM 3 TEST-PITS
ARCILLA POROSA – DADOS DE 3 POZOS EXPLORATORIOS

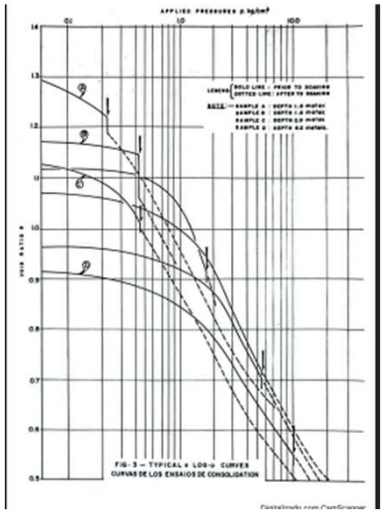
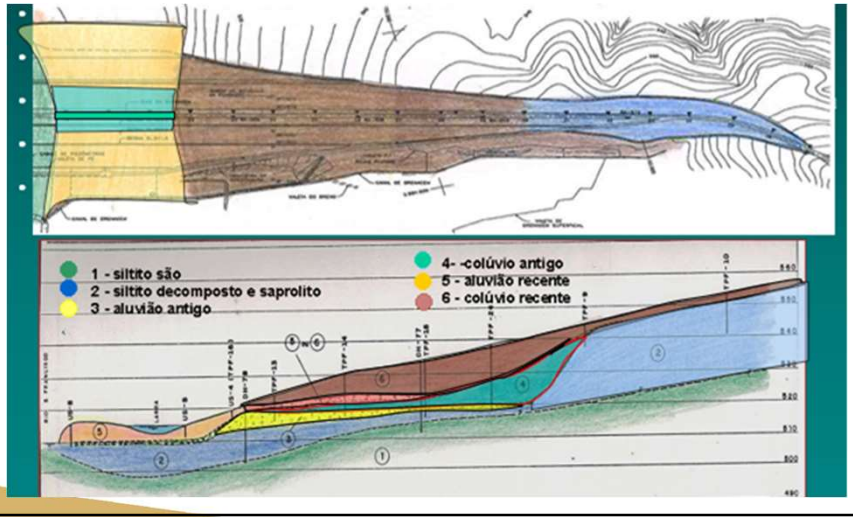


FIG-3 – TYPICAL e LOG-σ CURVES
CURVAS DE LOS ENSAIOS DE CONSOLIDATION

COMPORTAMENTO DA ARGILA POROSA

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

REANÁLISE DA PERCOLAÇÃO ATRAVÉS DO ATERRO E FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE TERRA DA UHE TRÊS MARIAS COBRAMSEG 2008, Prof. Dr. Romero César Gomes - UFOP/Adelaide Linhares de Carvalho Carim - CEMIG



Características da fundação

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- As camadas de cascalho atravessam toda a fundação da barragem, mas não se previa grandes percolações por esta feição.
- A camada de argila porosa vermelha sobreposta ao cascalho era extremamente fofa, passível de problemas de estabilidade e deformabilidade, com previsão de grandes recalques.
- A argila, estende-se de montante a jusante sem apresentar variações apreciáveis de espessura. Longitudinalmente estende-se das estacas 21+50m até 28+50m apresentando espessura muito variável, atingindo 9m, na estaca 24+20m.

Solução Adotada

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

. Remoção dos dois metros mais superficiais da argila porosa vermelha,

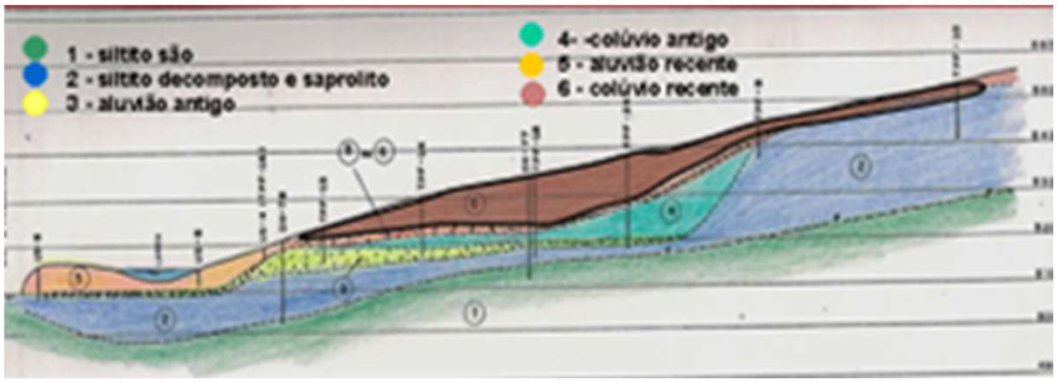
. Compactação da camada de argila remanescente,

. Estabelecimento de um limite para a escavação junto ao pé de montante da barragem e exigência de um recobrimento argiloso (2 m a 3 m) de espessura em toda a área de empréstimo a montante do barramento,

. Remoção de uma camada de cascalho a montante do eixo longitudinal.

Recalques da argila porosa

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS



Fim Período construtivo: Recalque de 1,36m na camada da argila porosa da fundação sob o eixo da barragem;

. Transversalmente o recalque diferencial máximo específico da argila porosa foi de 1:79 entre as distâncias de 40m e 60m a jusante;

Volta Grande

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- Fundação
- Compactação
- Secagem de amostras
- Gráfico de Plasticidade de Casagrande
- Harry Seed

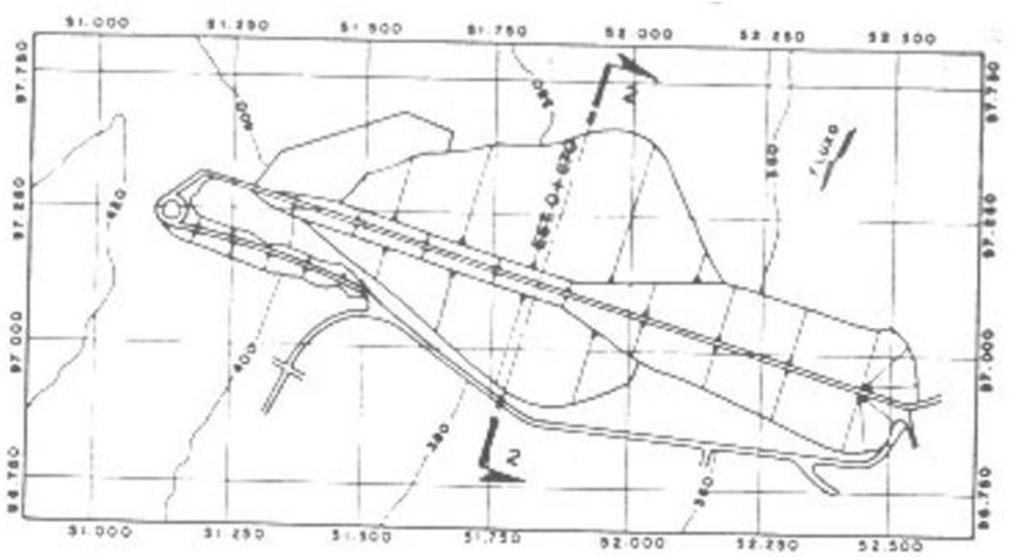
São Simão

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- Projeto de viabilidade iniciado em 1969. Reservatório enchido em 1977.
- Fundação da margem direita com espessa camada de colúvio poroso.
- O Prof. Casagrande recomendou a escavação da maior parte do coluvio e a criação de bermas a montante e a jusante com taludes muito abatidos (“beach slopes”).

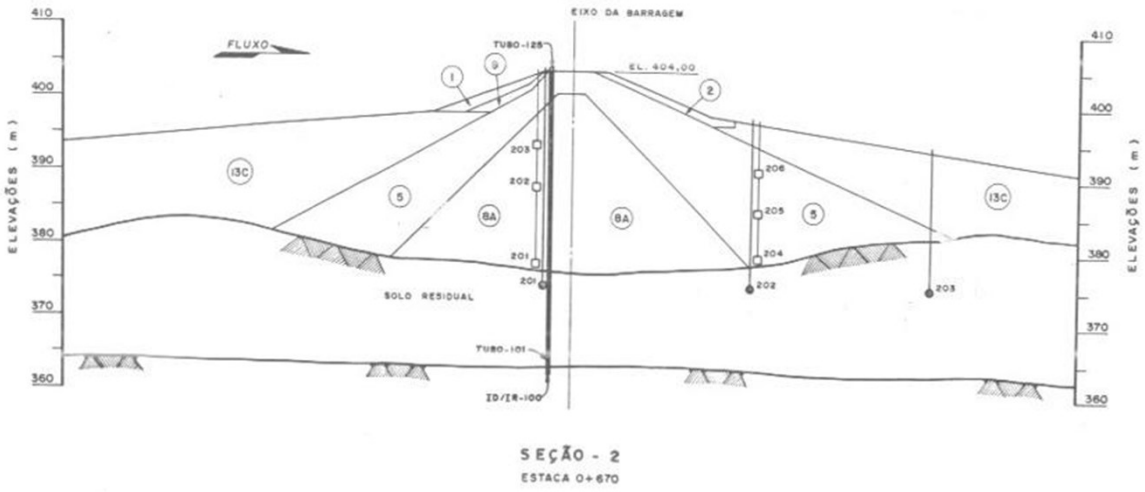
Planta Barragem Ombreira direita

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS



Seção na Est. 0+670

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS



Remoção do colúvio e reaterro da fundação

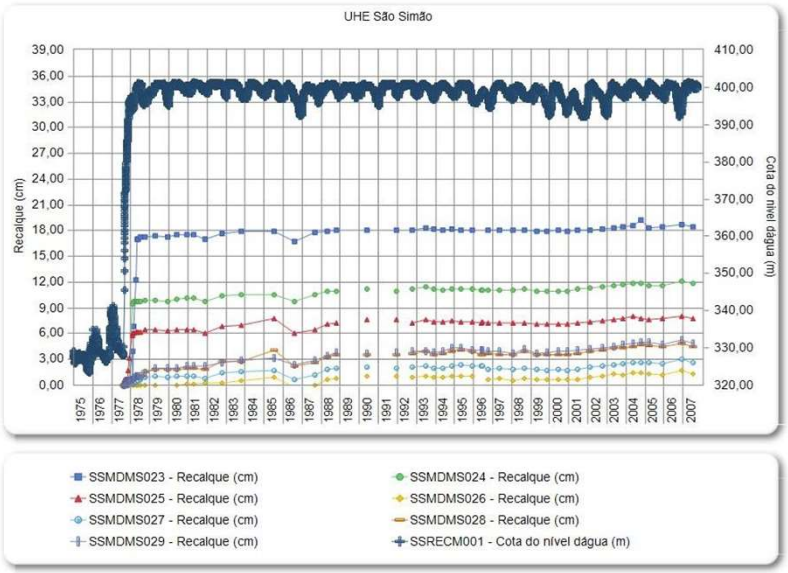
I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS





Recalque “instantâneo” / colapso

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS



Outros percalços com o solo poroso

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- Alguns outros casos de fundação em solo poroso foram descritos pelo Prof. Paulo Cruz no livro “100 Barragens Brasileiras”, 1996, e estão citados no Boletim 151 da ICOLD.
- O principal caso mencionado foi o da Barragem de Balbina, onde ocorreram canalículos desde alguns milímetros até 30 mm de diâmetro. Eles são produzidos principalmente por cupins. Foi necessário um extenso tratamento de fundação.
- Têm sido identificados canalículos em muitas barragens no Brasil e no exterior.

Canalículos

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- Neste evento foi apresentado o trabalho “*UHE BELO MONTE - CANALÍCULOS NAS FUNDAÇÕES DE DIQUES E BARRAGENS: DESAFIOS NA ETAPA DE OPERAÇÃO*”, por Marcelo B. Boaventura e outros.
- Durante a etapa de operação, entre 2020 e 2025, observações de campo e pesquisas diversas permitiram amadurecer a interpretação dos canalículos e respectivos tratamentos.
- Este artigo analisa 15 intervenções realizadas nesse período, com o objetivo de apresentar a construção progressiva de um modelo interpretativo das surgências associadas a canalículos.
- Foram comparadas duas técnicas de tratamento, filtros invertidos e trincheiras drenantes e comparada sua eficácia em relação à alimentação hidráulica da manifestação.
- Foi construída uma lógica de intervenção orientada pelo mecanismo predominante, resultando em critérios de diagnóstico, monitoramento e tratamento.
- O legado destes estudos foi a proposição de um critério de discernimento técnico aplicável a manifestações semelhantes em barragens implantadas sobre solos tropicais residuais.

Solos residuais tropicais em aterros de barragens e suas fundações.

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

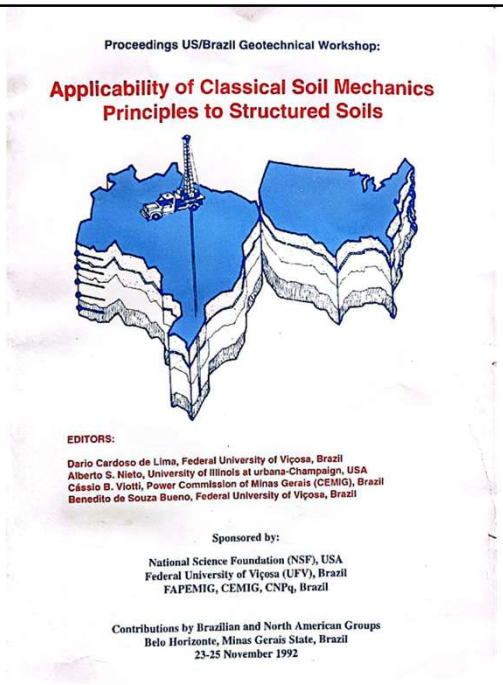
- Conforme descrito em relação à barragem Vigário/Terzaghi, inicialmente ouve uma preocupação quanto à utilização destes solos em aterros. Ainda existe um certo preconceito.
- Foi apresentado a este evento o trabalho *"COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO RESIDUAL DE FILITO COMO ATERRO COMPACTADO E COMO FUNDAÇÃO DE BARRAGEM",* de Pedro de Carvalho Thá e outros.
- No trabalho foi descrita a utilização de filito como material do aterro e fundação. Quando compactado, o solo perde a estrutura original e passa a apresentar comportamento mecânico dependente de suas características geotécnicas
- Existe também a preocupação com o comportamento desses solos em condições de carregamento não drenado, como a ocorrência de comportamento contrátil do material in situ, em função dos níveis de tensões aplicados e a ocorrência de perda de resistência pós pico.
- O s autores concluíram pela paridade de resistência entre o material in situ e compactado, ausência de efeito perceptível de quebra estrutural, tendência à dilatação para amostras profundas e contração inicial para superficiais, mas sem justificar preocupação com comportamento não drenado.

Continuação

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- Na **DAMSWEEK 2025**, em Porto Alegre, o Prof. Fernando *Schnaid*, especialista no assunto, afirmou que os solos residuais tendem a não estar sujeitos à liquefação.
- Atualmente no Brasil, estão sendo construídos aterros de barragens com praticamente todos os tipos de solos residuais, respeitando suas características geotécnicas e o posicionamento na seção típica.
- O Prof. Paulo Cruz relatou o "Emprego de Laterita na Barragem de Pitinga", IX COBRAMSEF, 1990, situada em meio à floresta amazônica. A finalidade foi cumprir o cronograma, utilizando um material menos susceptível a paralizações do aterro, devido a chuvas.
- Cabe emocionar aqui *um evento organizado pela Universidade de Viçosa e a Cemig*, em 1992, que reuniu significativo número de especialistas, com excelentes apresentações e discussões.

Evento UFV - Cemig


Proceedings US/Brazil Geotechnical Workshop:

Applicability of Classical Soil Mechanics Principles to Structured Soils

EDITORS:

Dario Cardoso de Lima, Federal University of Viçosa, Brazil
Alberto S. Nieto, University of Illinois at urbana-Champaign, USA
Cássio B. Viotti, Power Commission of Minas Gerais (CEMIG), Brazil
Benedito de Souza Bueno, Federal University of Viçosa, Brazil

Sponsored by:

National Science Foundation (NSF), USA
Federal University of Viçosa (UFV), Brazil
FAPEMIG, CEMIG, CNPq, Brazil

Contributions by Brazilian and North American Groups
Belo Horizonte, Minas Gerais State, Brazil
23-25 November 1992

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

Victor de Mello in “Applicability of Classical Soil Mechanics Principles to Structured Soils

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- Great are, indeed, the responsibilities that we geotechnicians and professionals of South America must shoulder on behalf of our fellowmen and societies, in extracting the essence of advancements from richer societies, while challenging and decrying any automatic application of their regulations and rituals.

Uma versão digital deste livro está disponível para os sócios do CBDB.

Outra Questão

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

- Tem sido também motivo de preocupações a existência de precipitados ferruginosos na saída dos tapetes horizontais de drenagem das nossas barragens.
- Estudo têm sido realizados e trabalhos diversos publicados, sem que haja, no que eu saiba, uma resposta definitiva e clara sobre os possíveis efeitos sobre os filtros. Há perda de material do aterro através do filtro.
- Não tenho conhecimento de algum caso em que esses precipitados tenham sido causa de prejuízos a uma barragem.
- Provavelmente na década de 1960, o consultor *Jack Hilf*, prestou consultoria à barragem de João Penido, em Juiz Fora e recomendou que fosse trocado o material do filtro de pé, por outro com especificação mais rigorosa.
- Atualmente tem sido usado o artifício de se afogar, quando possível, a saída dos drenos, porque o precipitado ferruginoso se forma quando a água entra em contato com o ar. Entretanto, houve um caso em que não deu certo.

Barragem do Piau

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

Piau Dam - Biological Clogging of the Drainage of the Downstream Toe, Adelaide Linhares and others, ICOLD Symposium, Seoul, 2004

- 23,5m high earth dam built in the early 1950's
- In 2002, pore pressures in the embankment increased and the phreatic level in the downstream toe reached very high levels, which could lead to slope instability.
- Analysis of the instrument data indicated that drainage of the downstream toe of the dam had been plugged. Inspection of this drainage confirmed this hypothesis, and revealed that it had been clogged by iron bacteria Gallionella, spp. and Leptothrix spp., as well as sulfur bacteria Thiothrix spp.
- In contrary to the expected, these bacteria were anaerobic ones.
- Maintenance work was conducted and the safety of the dam was re-established.

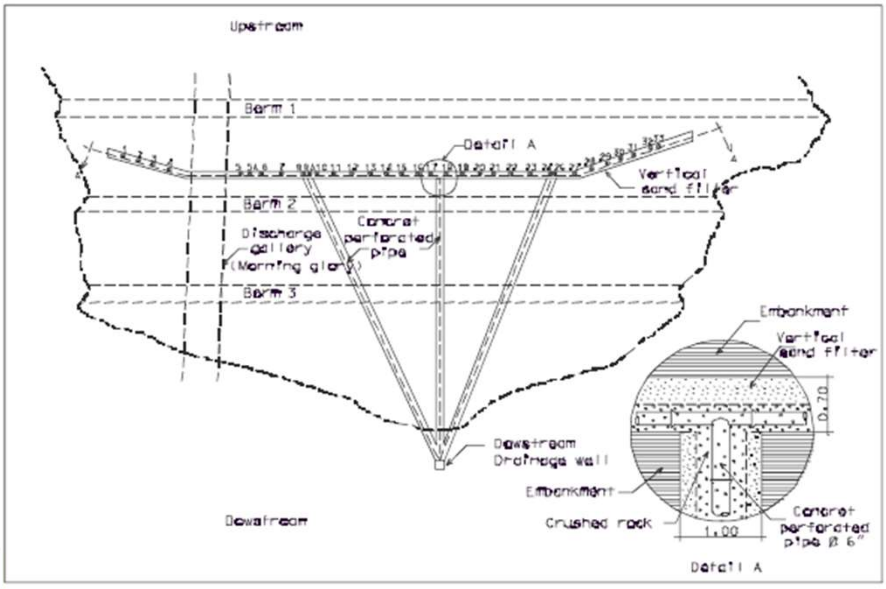


I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

Original drainage system

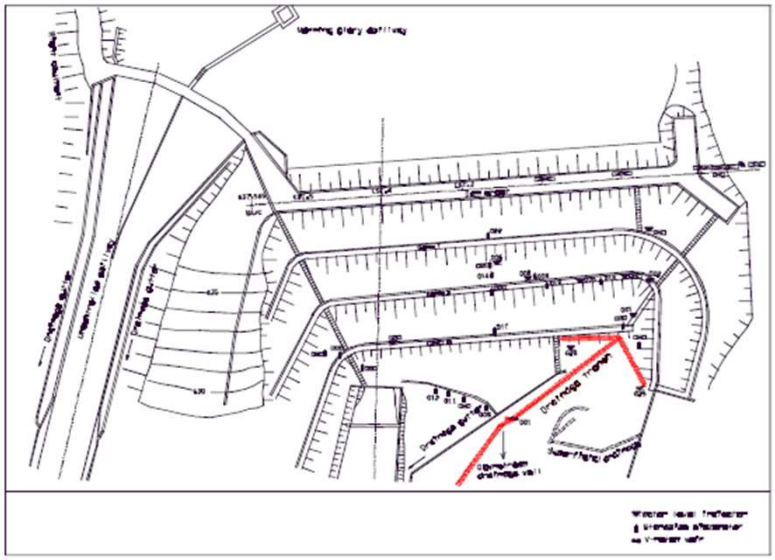
A. Casagrande: Seepage Through Dams, 1937

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS



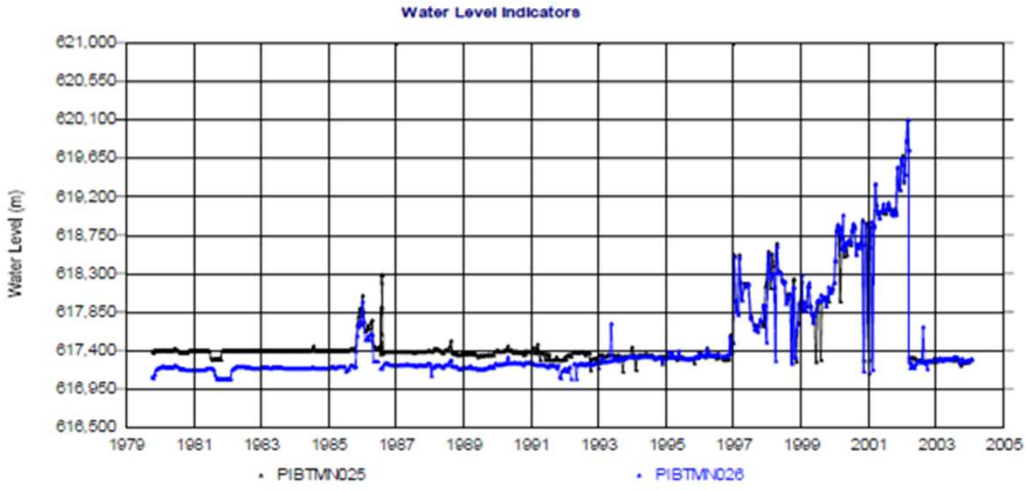
Additional drainage system

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS



Water level indicators

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS



Drainage pipe –
Porous concrete



I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

IO CONGRESSO DA ISSMFE - 1936

I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS

PRIMEIRA REUNIÃO INTERNACIONAL NA
GUERRA PERPÉTUA DO ENGENHEIRO
CIVIL CONTRA AS FORÇAS
TRAIÇOEIRAS DA NATUREZA,
ESCONDIDAS NA TERRA

Terzaghi



CIGB
ICOLD
CBDB

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS

www.cbdb.org.br | cbdb@cbdb.org.br
+55 21 2286-8674 | +55 21 98096-0609

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS
TEMA SR.2
BELÉM – PA, 23 DE SETEMBRO DE 2026

ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTECNICOS DA FUNDAÇÃO DOS DIQUES DE SELA DA BARRAGEM DO MIRIM, MINA DO SALOBO - SUDESTE DO ESTADO DO PARÁ

Daniele GONÇALVES
Geóloga Geotécnica - BVP Geotecnia e Hidrotecnia

Ayla KEPPEL
Geóloga Geotécnica - BVP Geotecnia e Hidrotecnia

Luciene ALMEIDA
Geóloga Geotécnica - BVP Geotecnia e Hidrotecnia

Tassila SILVA

Geólogo Geotécnico - Vale Base Metals

João RODRIGUES
Engenheiro-geotécnico - Vale Metais Básicos

RESUMO

Os diques de sela são estruturas auxiliares de uma barragem, construídos em selas topográficas para garantir a integridade do reservatório. Na Mina do Salobo, em Marabá (PA), o projeto original de alteamento da Barragem de Rejeitos do Mirim inclui dois diques de sela (I e II). A caracterização geológico geotécnica das fundações dessas estruturas é uma etapa inicial essencial, pois avalia resistência, composição e variações litológicas dos materiais que servirão de base para a construção. As estruturas estão inseridas em gnaisses do Supergrupo Itacaiúnas, pertencente ao Grupo Igarapé Salobo e, localmente, ao Complexo Xingu. A fundação dos diques é formada predominantemente por solos residuais e depósitos coluvionares derivados do intemperismo de rochas granito- gnáissicas, intrusões máficas, feições pegmatíticas e, ocasionalmente, rochas ferríferas. A caracterização foi realizada por meio de mapeamento em campo na escala 1:750, seguindo parâmetros geomecânicos do ISRM (2007). Os materiais avaliados mostram um perfil residual imaturo composto por um horizonte de solo residual maduro argilo siltoso, avermelhado, homogêneo, com resistência R1, grau de alteração A5-A6 e compacidade S6. Abaixo deste, ocorre um solo residual jovem/saprolítico, com resistência R0, grau de alteração/ intemperismo A4-A5 e compacidade S3-S4. Localmente, podem ocorrer blocos centimétricos de saprólito de gnaisse/metagranito (R2, A5), além de intrusões máficas bastante alteradas (R3, A3) e blocos de gnaisse mais resistentes (R4/A2/F3), correspondendo a rocha-matriz. Parte do perfil é recoberta por material coluvionar, onde também aparecem blocos associados a formações ferríferas.O mapeamento realizado foi fundamental para o conhecimento das condições da fundação e para assegurar a aplicação adequada dos parâmetros de projeto, contribuindo para a segurança das estruturas dos diques de sela.

ABSTRACT

Saddle dikes are auxiliary structures of a dam, built in topographic saddles to ensure the integrity of the reservoir. At the Salobo Mine, in Marabá (PA), the original design for raising the Mirim Tailings Dam includes two saddle dikes (I and II). The geological and geotechnical characterization of the foundations of these structures is an essential initial step, as it assesses the resistance, composition, and lithological variations of the materials that will serve as the base for the construction. The structures are embedded in gneisses of the Itacaiúnas Supergroup, belonging to the Igarapé Salobo Group and, locally, to the Xingu Complex. The foundation of the dikes is predominantly formed by residual soils and colluvial deposits derived from the weathering of granite-gneissic rocks, mafic intrusions, pegmatitic features, and occasionally, iron-bearing rocks. The characterization was carried out through field mapping at a scale of 1:750, following geomechanical parameters of the ISRM (2007). The evaluated materials show an immature residual profile composed of a mature, reddish, homogeneous, clayey-silty residual soil horizon with resistance R1, alteration degree A5-A6, and compactness S6. Below this, there is a young/saprolitic residual soil with resistance R0, alteration/weathering degree A4-A5, and compactness S3-S4. Locally, centimetric blocks of gneiss/metagranite saprolite (R2, A5) may occur, in addition to highly altered mafic intrusions (R3, A3) and more resistant gneiss blocks (R4/A2/F3), corresponding to the parent rock. Part of the profile is covered by colluvial material, where blocks associated with iron formations also appear. The mapping carried out was fundamental for understanding the foundation conditions and for ensuring the proper application of design parameters, contributing to the safety of the saddle dike structures.

.

1. INTRODUÇÃO

O aumento progressivo da demanda por estruturas de contenção associadas à mineração tem exigido o desenvolvimento de projetos geotécnicos cada vez mais integrados às condições geológicas locais, principalmente em regiões de ocorrência de perfis residuais tropicais espessos e heterogêneos. Em ambientes tropicais, os processos intensos de intemperismo promovem elevada variabilidade litológica, estrutural e geomecânica, o que influencia diretamente o comportamento das fundações de barragens e diques.

Nesse contexto, o Projeto Salobo, localizado no sudeste do estado do Pará, contempla a Barragem do Mirim e estruturas complementares associadas à contenção de rejeitos e reservação de água. Dentre essas estruturas, destacam-se os Diques de Sela I e II, implantados com a finalidade de delimitação da área alagada do reservatório decorrente dos alteamentos previstos para a Barragem do Mirim.

Os Diques de Sela consistem estruturas de terra homogênea, implantadas em etapas sucessivas de alteamento, cuja configuração final prevê coroamento na elevação 293 m. Em função das condições geológicas e geotécnicas locais, o desenvolvimento do projeto demandou extensas campanhas de investigação, mapeamento geológico-geotécnico e acompanhamento executivo contínuo.

A fundação da estrutura apresenta significativa variabilidade de materiais, incluindo solos residuais maduros e jovens, rocha alterada, blocos e lajedos de gnaisse/metagranito, além de depósitos coluvionares. Tal cenário exigiu adequações contínuas dos critérios de escavação, tratamento e implantação da drenagem interna da estrutura.

O presente artigo apresenta os principais aspectos geológico-geotécnicos observados durante as etapas de investigação, projeto e construção da fundação do Dique de Sela I, enfatizando os critérios adotados para tratamento de fundação, os condicionantes geológicos identificados em campo e sua integração para o desenvolvimento executivo da obra.

2. LOCALIZAÇÃO

O Projeto Salobo localiza-se integralmente na Floresta Nacional do Tapirapé-Aquiri, no município de Marabá, estado do Pará (Figura 1). O Dique de Sela I encontra-se implantado aproximadamente 3,5 km ao norte da Barragem do Mirim, integrando o sistema de contenção de rejeitos e reservação de água do empreendimento.

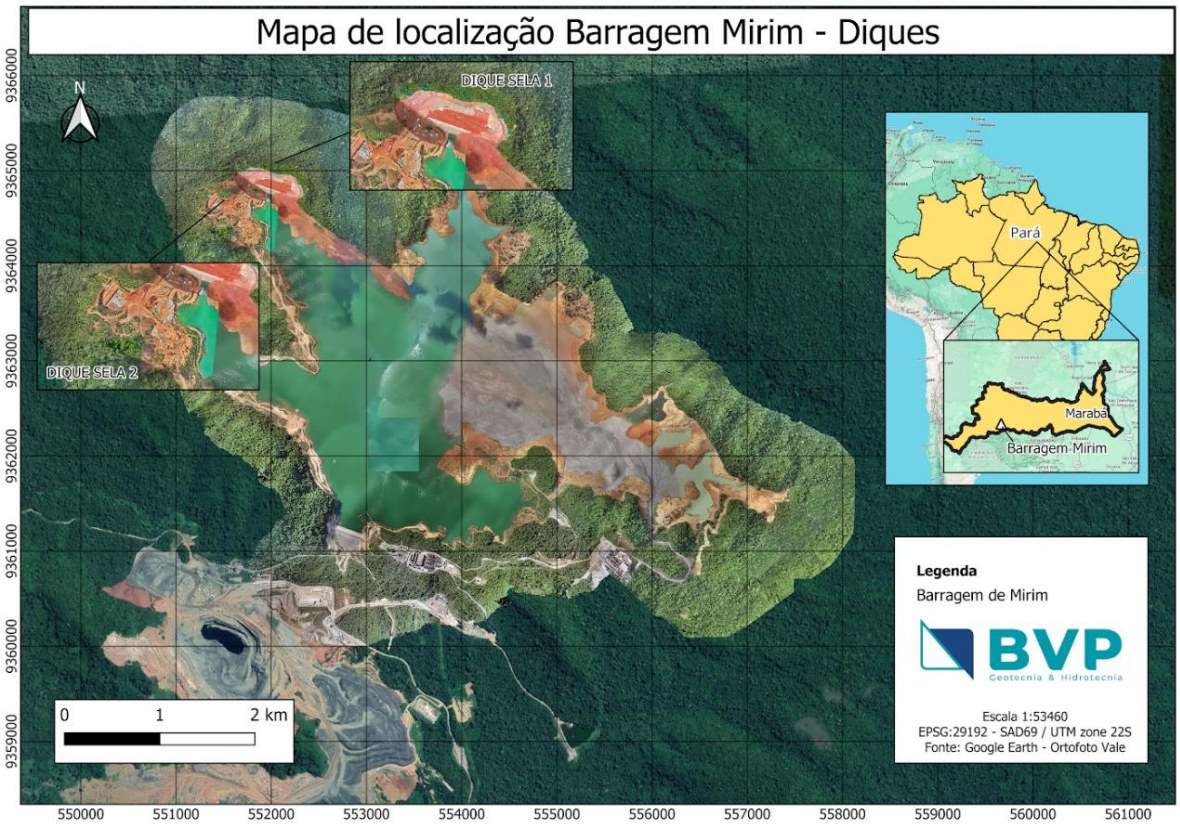


Figura 1 – Localização geral da Barragem do Mirim, com ênfase nos Diques de Sela I e II (Fonte: Google Earth).

3. CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO

3.1 Aspectos Geológicos Regionais

A área da Barragem do Mirim situa-se no contexto da Província Mineral de Carajás – A área estudada situa-se no contexto da Província Mineral de Carajás – PA, na região do Projeto Salobo, sendo que este, constitui o complexo minerador da maior jazida de Cu-Au (Ag) do território nacional. O depósito mineralizado apresenta uma extensão na direção SE-NW de aproximadamente 4 km, com uma profundidade investigada de 750 metros a partir da topografia original e uma largura que varia de 600 metros na porção central a 100 metros nas extremidades.

Verifica-se na Figura 1 que, geologicamente, o projeto Salobo encontra-se na porção SE do Cráton Amazônico, no Estado do Pará, que em síntese é constituída por migmatitos, gnaisses e granodioritos, sequências vulcano-sedimentares, além de coberturas sedimentares clasto-químicas, unidades estas que foram reunidas ao longo da evolução do conhecimento geológico da região em Supergrupos, Grupos e Formações. Estruturalmente a área do projeto está encaixada na borda sul do chamado Duplex Transpressivo do Salobo [1] ou Sidewall Ripout do Salobo [6].

Geologicamente, a barragem está encaixada nos quartzitos do Supergrupo Itacaiúnas, pertencente, regionalmente, ao Grupo designado como Igarapés Salobo [2][3][7].

O Grupo Igarapé Salobo é formado pelo Gnaisse Cascata e Formação Três Alfa (anfibolitos, quartzitos, metagrauvacas e formações ferríferas) na base e no topo é formado pela Formação Cinzento com gnaisses e quartzitos [3]. Este grupo é hospedeiro do depósito de óxido de ferro Cu-Au do Salobo [3][5], apresenta idades estimadas entre 1,9 e 2,8 Ga e encontra-se encaixado em gnaisses do Complexo Xingu [8], conforme pode ser observado na Figura 1.

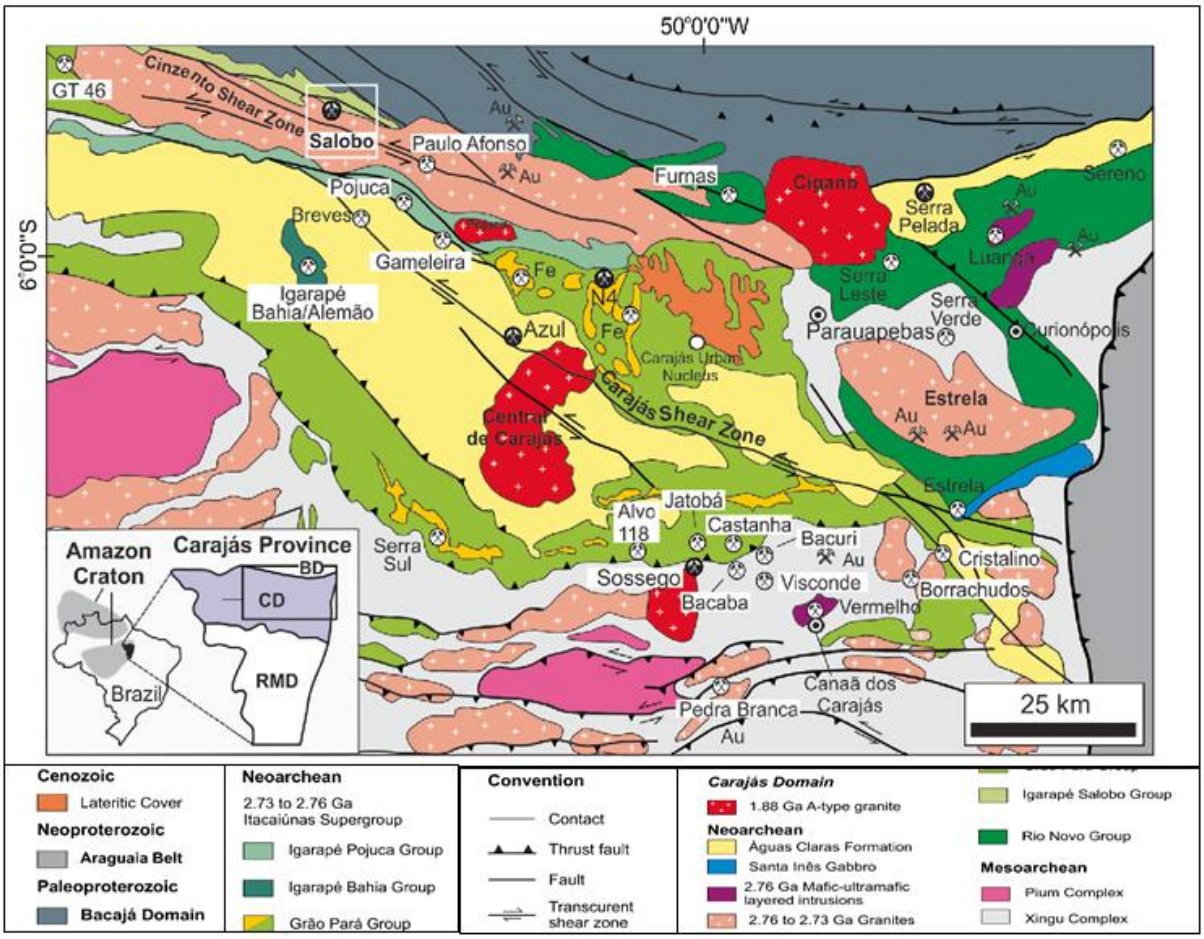


Figura 2 – Mapa geológico da província mineral de Carajás com os principais depósitos minerais. Modificado de [8].

3.2 Caracterização geológico-geotécnica da fundação dos Diques de Sela

A caracterização geológico-geotécnica das fundações foi realizada com base em mapeamento e reconhecimento dos litotipos em campo. Foram avaliadas as características de cada litotipo em particular em comparação com os parâmetros geomecânicos já utilizados e validados pela BVP, conforme Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 1 - Classificação do grau de resistência do maciço (modificada pela BVP Engenharia, 2012).

ISRM (ADAPTADO)										
Índice de Resistência [2]		Descrição	Rc (MPa)	I.S. (MPa)	Avaliação de Campo					
					Martelo	Risco Canivete [1]	Queda Canivete	Raspagem Canivete [1]	Risco Unha	Pressão Manual
R6		Extremamente resistente	>250	>10	Lascada	-	-	-	-	-
R5		Muito resistente	100 - 250	4 - 10	Quebra com dificuldade com vários golpes	-	-	-	-	-
R4		Resistente	50 - 100	2 - 4	Quebra com vários golpes	Risco superficial	-	-	-	-
R3		Medianamente resistente	25 - 50	1 - 2	Quebra com dificudade com um golpe		Ponto pequeno	Com muita dificuldade	-	-
R2	R2 +	Pouco resistente	10 - 25	-	Quebra com um golpe	Risca		Com dificuldade	-	-
	R2 -	Branda	5 - 10		Fragmenta com um golpe		Ponto grande	Produz pó	Risco superficial	-
R1	R1 +	Muito branda superior	3 - 5	-		Risca fundo		Com facilidade produz muito pó	Risca	Quebra pontualmente
	R1 -	Muito branda inferior	1 - 3		Desagrega	Corta (separa)	Penetra	Descasca entralha	Penetra	Quebra as bordas
R0		Extremamente branda	0.25 - 1	0	-	-	Penetra	-	Corta	Desagrega

Notas:
[1] O martelo de geólogo deve prevalecer sobre o uso do risco com canivete em amostras R3 e R4 que sejam muito ricas em minerais lamelares;
[2] Referências típicas R0 / R1+ (saprolitos); R1+ (tijolo); R2- (solo-cimento); R2+ (concreto comum); R3 (concreto especial);
[3] Siglas: /.S: Indice Puntiforme, RC: Resistência a compressão Uniaxial.

ÍNDICE DE REAÇÃO AO MÉTODO
Alta
Média
Baixa

Tabela 2 - Tabela de classificação do grau de alteração de rochas (adaptado pela BVP Engenharia).

Grau	Alteração	Descrição
A6	Solo	Residual (Maduro ou Jovem) Transportado (Aluvião ou Colúvio)
A5	Extremamente Alterada	Apresentam minerais primários físico e quimicamente alterados e totalmente pulverulentos. A textura original é preservada.
A4	Muito Alterada	Apresenta minerais primários muito alterados físico e quimicamente, por vezes pulverulentos e friáveis.
A3	Medianamente Alterada	Apresenta minerais primários muito alterados físico e quimicamente. Rocha bastante descolorida.
A2	Levemente Alterada	Minerais primários apresentam alterações físicas e químicas incipientes. Rocha ligeiramente descolorida.
A1	Rocha Sã	Apresenta minerais primários sem vestígios de alteração.

Tabela 3 - Tabela de classificação da compacidade dos solos argilosos/siltosos, segundo ISRM.

Classe	Consistência	Rc (Mpa)	Resposta Mecânica	SPT
S6 (Saprolito)	Dura	>0,5	Indentada pelo polegar com dificuldade	>30
S5	Muito Rija	0,25 a 0,5	Facilmente indentada pelo polegar	20 a 30
S4	Rija	0,1 a 0,25	Facilmente indentada pelo polegar, mas penetrada só com grande esforço	11 a 19
S3	Média	0,05 a 0,1	Penetrável com dificuldade vários centímetros pelo polegar	6 a 10
S2	Mole	0,025 a 0,05	Facilmente penetrável vários centímetros pelo polegar	3 a 5
S1	Muito Mole	< 0,025	Facilmente penetrável vários centímetros pelo punho	<2

Tabela 4 - Classificação do grau de fraturamento (ISRM,1981).

Categoria	Espaçamento médio das Fraturas (cm)	N° de Fraturas por metro	Descrição
1	> 200	<0,5	Maciço
2	200-60	0,5-2	Pouco Fraturado
3	60-20	2-5	Medianamente Fraturado
4	20-6	5-17	Muito Fraturado
5	<6	<17	Extremamente Fraturado

3.3 Informações preliminares da fundação do Dique de Sela I

Os mapeamentos geológico-geotécnicos realizados ao longo das diferentes etapas executivas permitiram identificar significativa variabilidade lateral e vertical das condições de fundação.

As principais unidades identificadas na implantação dos Diques de Sela compreendem:

- solo residual de gnaisse/metagranito;
- rocha alterada;
- blocos e lajedos de gnaisse;
- materiais coluvionares;

- materiais saturados localizados;
- níveis ferruginosos intemperizados.

Os solos residuais observados apresentam comportamento heterogêneo, com variações granulométricas, estruturais e de resistência relacionadas tanto ao litotipo de origem quanto ao grau de alteração intempérica.

Nas porções mais superficiais foram identificados materiais coluvionares e solos de baixa compacidade, localmente saturados, associados principalmente às regiões de baixada e drenagens naturais. Em contrapartida, as ombreiras apresentaram predominância de materiais residuais derivados de gnaisse e afloramentos rochosos parcialmente alterados.

A presença de rocha alterada com foliação expressiva e ocorrência localizada de mica demandou atenção especial durante os tratamentos superficiais da fundação, principalmente em regiões de contato com o aterro compactado.

4. MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DOS LITOTIPOS DO DIQUE DE SELA I DA BARRAGEM DO MIRIM

Durante as diversas fases da obra da construção dos Diques de Sela foram realizados mapeamentos da fundação da estrutura, sendo esta, uma atividade constante realizada pelos responsáveis técnicos que acompanham a obra desde as primeiras fases, até a condição atual.

As avaliações foram realizadas de forma sistemática e contínua, acompanhando a evolução da obra entre as elevações 240,00 e 270,00, contemplando as etapas 246–255, 265–270 e as liberações posteriores da fundação.

Os mapeamentos permitiram caracterizar os materiais presentes na fundação e também nas ombreiras, os quais constituem predominantemente um perfil laterítico residual imaturo desenvolvido sobre gnaisse/metagranito.

A descrição detalhada destes litotipos é apresentada a seguir.

4.1 Solo coluvionar

O solo coluvionar laterizado corresponde a um horizonte terroso alóctone que recobre os materiais residuais nas ombreiras e porções de jusante. Apresenta coloração variando de vermelha a laranja escuro, matriz predominantemente argilo-siltosa a levemente arenosa e com fragmentos, blocos e matacões de formação ferrífera e gnaisse. Também ocorrem concreções de óxidos de ferro e manganês dispersas na matriz. O contato com o solo residual subjacente é irregular, variando em espessura ao longo da fundação, enquanto a consistência varia de média a rija conforme a umidade do material (Figura 2).



Figura 2 - Colúvio laterizado sobreposto a solo residual de gnaisse no nível 246,00m para 249,00m na ombreira direita. Visada para montante.

4.2 Solo residual de gnaisse

O solo residual de gnaisse/metagranito constitui o principal horizonte observado ao longo das etapas de escavação da fundação. Trata-se de um material autóctone com textura argilo-siltosa a arenosa, coloração variegada variando entre tons amarelados, alaranjados, avermelhados e rosados, além de consistência média a rija (Figura 3).



Figura 3 - Solo residual de gnaisse na ombreira esquerda na rampa de acesso a praça P2.

4.3 Saprolito de gnaisse

O saprolito de gnaisse tem composição argilo-arenosa a silto-arenosa, coloração variegada esverdeada a amarelada, por vezes esbranquiçada devido às passagens caulinizadas, com resistência predominante R0. Difere do solo residual pela

preservação marcante das estruturas reliquiares da rocha original, especialmente a foliação. Em alguns trechos, o material desagrega facilmente nas mãos e apresenta surgências d'água próximas ao contato com a rocha menos alterada. Localmente também ocorrem blocos preservados da rocha matriz em meio ao horizonte saprolítico (Figura 4).

Ao longo das etapas finais de liberação da fundação foram identificadas diversas feições pegmatíticas intensamente intemperizadas, fragementadas e caulinizadas, encaixadas principalmente nos horizontes saprolíticos (Figura 4). Essas feições apresentam extensões métricas e larguras centimétricas a decimétricas, localmente gerando material granular arenoso. Também foram observados pares de veios pegmatíticos e quartzosos preenchendo fraturamentos originais da rocha matriz, com direções preferenciais variando entre 255° e 320° (Figura 5**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).



Figura 4 - Saprolito de gnaisse da fundação do Dique de Sela 1, com feições pegmatíticas.

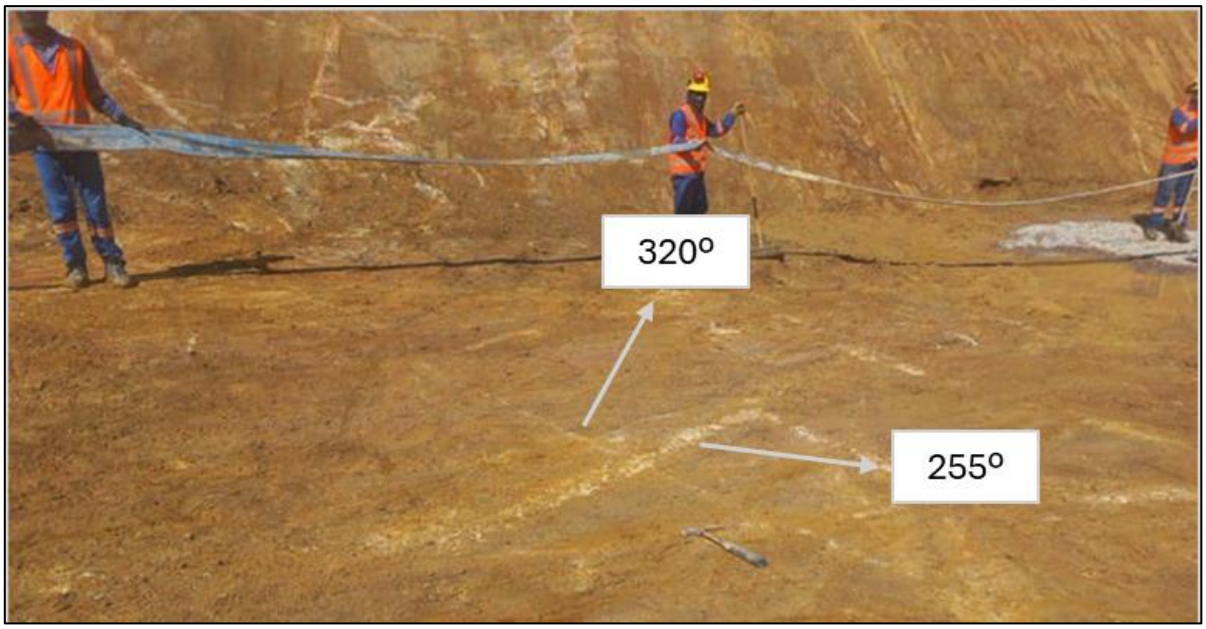


Figura 5 - Detalhe do saprolito e dos veios pegmatíticos preenchendo o fraturamento original da rocha matriz, mostrando o ângulo de cruzamento em torno de 65°.

4.3 Gnaisse/Metagranito – Rocha sã a pouco alterada

A rocha gnáissica apresenta coloração acinzentada, textura fanerítica média a grossa e foliação marcada pela segregação de bandas claras e escuras. Em diversos pontos foram identificados veios de quartzo e feições pegmatíticas cortando discordantemente a estruturação da rocha, normalmente associados ao fraturamento do maciço. Bandas félsicas intemperizadas também ocorrem concordantes à foliação do gnaisse/metagranito.



Figura 6 - Rocha sã (R4A3F4) medianamente fraturada aflorando na ombreira direita e no pé do talude de jusante.

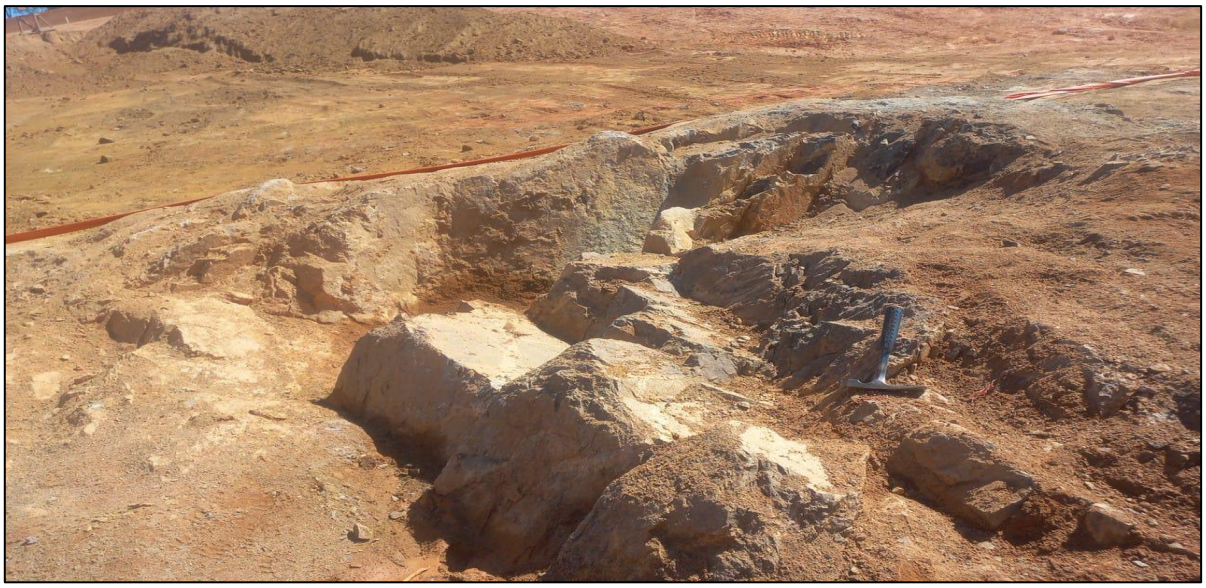


Figura 7 - Afloramento de gnaisse/metagranito em lajedos exposto pela escavação na região de jusante do Dique de Sela I.

4.4 Rocha Ferruginosa alterada e intrusões máficas

Localmente, na ombreira direita, foi identificada uma zona de contato abrupto entre o solo residual de gnaisse/metagranito e uma rocha ferruginosa intensamente intemperizada. Essa unidade apresenta coloração vermelho intensa nas porções mais alteradas e bandamento regular composto por bandas ferruginosas escuras e magnéticas alternadas com bandas claras quartzosas, remetendo a uma formação ferrífera bandada (Figura 8).



Figura 8 - Visão geral da ombreira direita. Contato entre solo residual de gnaisse e rocha ferruginosa intemperizada.

Ainda na ombreira direita, entre as elevações 267 e 269 m, foram observadas intrusões máficas intemperizadas encaixadas no solo residual maduro (Figura 9). O material apresenta composição silto-argilosa, coloração avermelhada com manchas esbranquiçadas e elevado grau de alteração, ocorrendo de forma desmantelada em meio aos horizontes residuais da fundação.



Figura 9 - Intrusão máfica intemperizada cortando a ombreira direita

Os dados gerais de mapeamento foram consolidados no mapa da Figura 11.

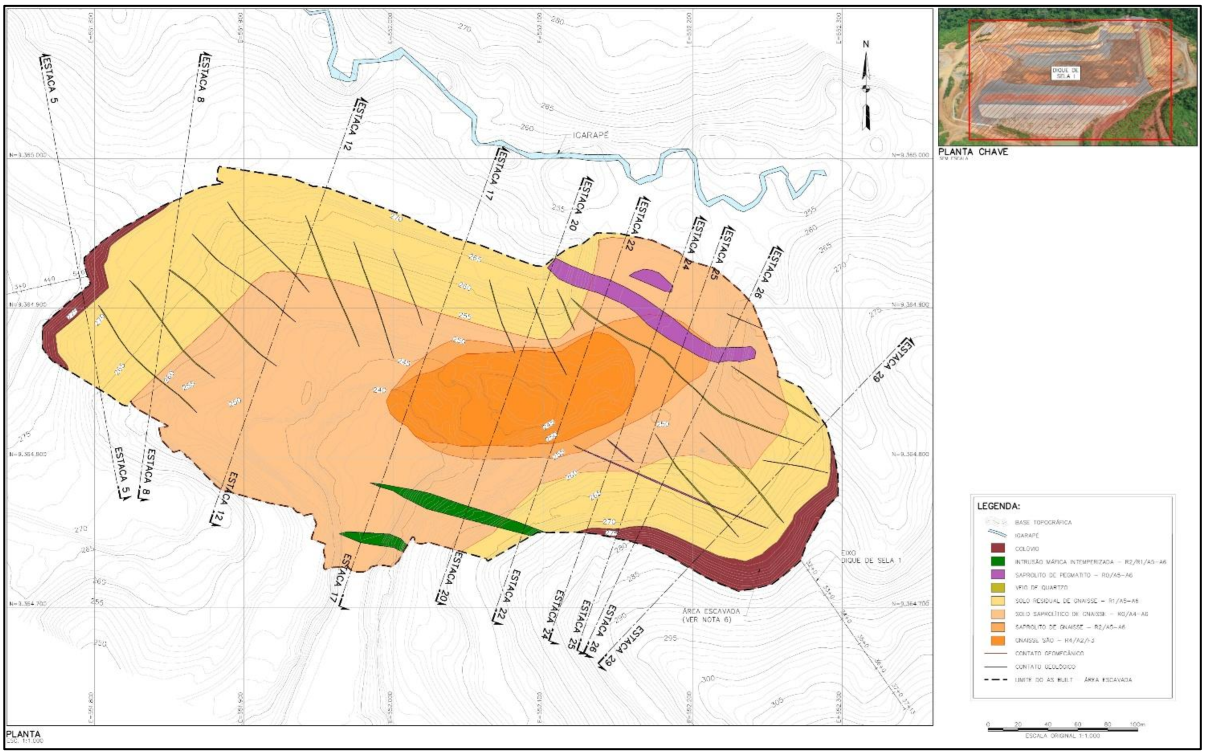


Figura 10 - Mapa geológico-geotécnico da base da fundação do Dique de Sela I.

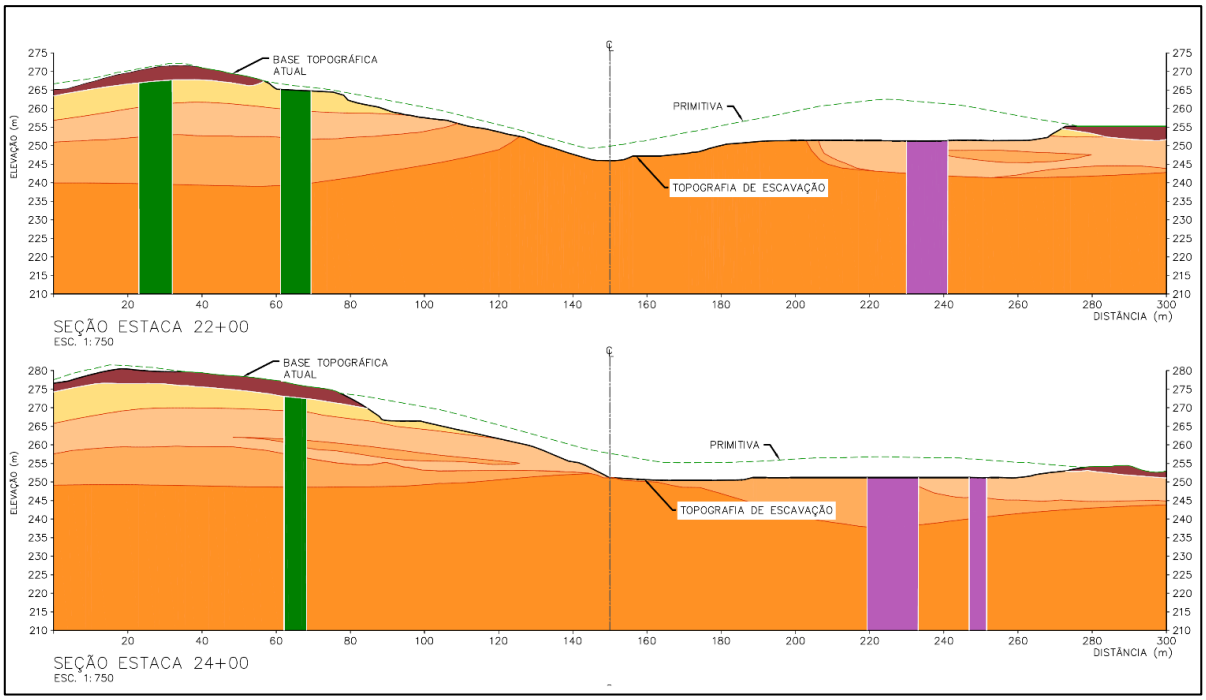


Figura 11 - Seções geológico-geotécnicas.

5. CONCLUSÕES

Com base nos dados levantados e identificados nas atividades de avaliação e liberação de fundações nas regiões da base do espaldar de jusante, septo e ombreiras direita e esquerda, os materiais avaliados compõem um perfil residual imaturo composto da base para o topo por um solo residual maduro, argilo-siltoso, de coloração avermelhada, homogêneo, com resistência R1, grau de alteração A5-A6 e compacidade S6, seguido de um horizonte de solo residual jovem/saprolítico com resistência R0, grau de alteração A4-A5, compacidade variando entre S3-S4. Localmente pode-se observar porções onde ocorrem blocos centimétricos de saprólito de gnaisse/metagranito com coloração acinzentada, resistência R2, grau de alteração A5. Também ocorrem intrusões máficas, com coloração avermelhada e bastante desmanteladas com resistência R1, grau de alteração A5, além de blocos de gnaisse/metagranito são R4/A2/F3. Veios pegmatíticos desmantelados e caulinizados cortam os litotipos da fundação desde a base até o topo. Veios de quartzo métricos, ora íntegros, ora desmantelados, por vezes persistentes, também ocorrem cortando estes litotipos desde o estágio de rocha sã até o topo quando o material já está plenamente transformado em solo residual maduro.

6. PALAVRAS-CHAVE

Dique de sela, solo residual, intemperismo, Mina do Salobo, Barragem do Mirim.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ARAÚJO, O.J.B. & MAIA, R.G.N. (1991) - Programa de Levantamentos Geológicos Básicos, Programa Grande Carajás, Folha SB-22-A, Estado do Pará, DNPM/CPRM, 164p, Relatório técnico, Brasília.

[2] COSTA, J.B.S. & SIQUEIRA, J.B. (1991) - Transtração e transpressão ao longo do Lineamento Cinzento, Revista Brasileira de Geociências, 20, 4-20, 234-238p, Brasil.

[3] DOCEGEO (1988) - Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás, Congresso Brasileiro de Geologia, Anais 35, SBG, p.10-54, Belém.

[4] CRUZ, P. T. (1996) - 100 Barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projeto, Oficina de Textos, 647p. São Paulo.

[5] LINDENMAYER, Z. (1990) - Salobo, Carajás, Brazil: Geology, Geochemistry and Metamorphism. Western Ontário, University of Western Ontário, Department of Geology, 405p, Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Geology, University of Western Ontario.

[6] PINHEIRO, R. V. L.; HOLDSWORTH, R. E. (1997) - Reactivation of Archaean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil, Journal Geological Society, London, v. 154, p. 99-103.

[7] SIQUEIRA, J.B. (1990) - Organização litoestrutural do dúplex Salobo-Mirim, Serra dos Carajás, PA. Belém. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 125p. Tese (Mestrado em Geologia) - Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, UFPA, 1990.

[8] VASQUEZ, M.L.; ROSA-COSTA, L.T. da (orgs.). (2008) - Geologia e recursos minerais do estado do Pará, CPRM, Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil - PGB. Belém.

Autores:



Daniele GONÇALVES

Mestre em Geologia pela UFPa, Especialista em Lavra de Minas a céu aberto, Especialista em Geotecnia e segurança de pilhas e barragens e Estabilidade de taludes. Geóloga formada pela UFPa. Atua na BVP como Geóloga-geotécnica no Acompanhamento Técnico em Obras de Barragens e Diques bem como no apoio a projetos de Barragens e de Avaliação e Estabilização de taludes.



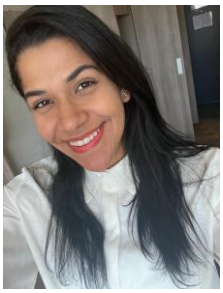
Ayla KEPPEL

Engenheira Geóloga formada pela UFOP-MG, atualmente pós-graduanda em Engenharia em Geotecnia pela PUC de Minas Gerais. Atua na BVP na área de geotecnia aplicada à mineração, com ênfase em mapeamento geológico-geotécnico, interpretação de sondagens, modelagem geológico-geotécnica e estudos de estabilidade para obras de engenharia**.**



Luciene ALMEIDA

Mestre em Geologia Estrutural /Tectônica pela UFOP-MG. Engenheira Geóloga formada pela UFOP-MG. Atua na BVP como geóloga-geotécnica em projetos geotécnicos nas áreas de Mineração e Hidroenergia, incluindo barragens, pilhas de estéril/rejeito e descaracterização. Ampla experiência em mapeamento em mapeamento geológico-geotécnico e estrutural em minas a céu aberto e subterrânea, obras civis, pilhas de estéril e barragens de rejeito e hidrelétricas.



Tassila SILVA

Engenheira Civil formada pelo IFTO- Instituto Federal do Tocantins. Pós-graduada em Engenharia Geotécnica na PUC.
Atual na Vale Base Metals como Engenheira Geotécnica nas áreas de inspeção e monitoramento da barragem do Salobo.



João RODRIGUES

Mestre em Geotecnia pela UFOP. Doutorando em Geotecnia pela UFOP. Engenheiro de Produção Civil, formado pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Engenheiro de Minas pela UFMG. Atualmente está como Gerente técnico na VALE Metais Básicos.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS
TEMA SR.2
BELÉM – PA, 23 DE SETEMBRO DE 2026

BARRAGENS DE TERRA COM SOLOS TROPICAIS. O DESEMPENHO DE UM PROJETO DE KARL TERZAGHI

Bruno NEVES
Consultor/Engenheiro Técnico-Comercial Carpi Group

Alberto SAYÃO
Consultor geotécnico, ex-prof. PUC-Rio

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise do comportamento geotécnico de solos residuais tropicais usados na construção de grandes barragens de terra, tendo como estudo de caso a histórica Barragem Terzaghi, em Piraí, RJ. Diferente dos materiais sedimentares comuns em regiões de clima temperado no hemisfério norte, o solo residual de gnáissico usado na Barragem de Terzaghi exibe características singulares, ditadas por seu perfil de intemperismo e gênese pedogenética. No estado natural inalterado, o horizonte saprolítico abriga macroporos que conferem condutividade hidráulica elevada ao solo. Contudo, os processos de escavação e compactação destroem essa estrutura reliquiar, transformando o material compactado em um silte arenoso com baixa permeabilidade. Durante a construção, Karl Terzaghi alertou para a vulnerabilidade técnica desse material, destacando sua alta compressibilidade e o risco de gerar poropressões elevadas, caso o solo fosse compactado acima da umidade ótima, o que exigia controle rigoroso, sob condições de fortes chuvas tropicais. Apesar dos desafios, ensaios triaxiais revelam que a matriz compactada de solo residual tem uma virtude mecânica decisiva: sob condições saturadas e não drenadas, o esqueleto siltoargiloso mobiliza um elevado ângulo de atrito, garantindo estabilidade superior à prevista pelos métodos clássicos. Adicionalmente, o estudo avalia a estabilidade da barragem após mais de seis décadas frente ao acúmulo de até 30 metros de assoreamento na face de montante. Simulações por elementos finitos e instrumentação de campo evidenciam que essa camada de sedimentos não afetou a estrutura; pelo contrário, promoveu a redução do fluxo através do núcleo da barragem. Conclui-se que os solos residuais tropicais, quando combinados a robustos sistemas de filtros e drenagem interna, são materiais estruturalmente seguros em longo prazo.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the geotechnical behavior of tropical residual soils used in the construction of large earth dams, focusing on the historic Terzaghi Dam as a case study. Unlike sedimentary materials from temperate climates, the residual gneissic soil used in in Terzaghi Dam exhibits singular characteristics ruled by its weathering profile and pedogenetic origin. In its natural undisturbed state, the saprolite soil contains macropores providing high hydraulic conductivity. However, excavation and compaction processes destroy this relict structure, converting the compacted material into a sandy silt with a very low permeability. During construction, Karl Terzaghi warned of the technical vulnerability of this material, highlighting its high compressibility and the risk of generating large pore pressures if the soil were compacted at or above optimum moisture content, which required strict control under tropical rainfall conditions. Despite these challenges, triaxial test results show that compacted tropical soil holds a key mechanical feature: under saturated undrained conditions, the silty clayey skeleton mobilizes a high friction angle, ensuring stability superior to that predicted by classical methods. In addition, the study evaluates the dam stability after more than six decades of about 30 meters of sedimentation accumulated on the upstream face. Finite element simulations and field instrumentation show that this sediment layer did not harm the structure; on the contrary, it helped to reduce seepage through the dam's core. It is concluded that tropical residual soils, when combined with robust filter and internal drainage systems, are structurally safe materials in the long term.

1. INTRODUÇÃO

A construção de grandes barragens de terra em regiões tropicais foi historicamente, fundamentada em experiências e métodos clássicos desenvolvidos para materiais sedimentares de climas frios e temperados [1], [2]. No entanto, a utilização de solos residuais tropicais, a exemplo daqueles originados a partir da alteração do gnaisse, impõe desafios singulares e comportamentos mecânicos particulares, os quais são intrinsecamente governados pela ação de perfis de intemperismo e pela gênese pedogenética inerente a esses ambientes [3].

Nesse contexto de evolução tecnológica da construção de barragens de terra, a Barragem Terzaghi consolida-se como um estudo de caso singular e um marco histórico fundamental da geotecnia [1]. Localizada na cidade de Piraí, no Estado do Rio de Janeiro, a estrutura foi erguida com o propósito de receber as águas transpostas do sistema Piraí-Paraíba do Sul e conformar um reservatório com 38 milhões de metros cúbicos [4]. O empreendimento contou com a marcante atuação técnica do engenheiro austríaco Karl von Terzaghi, reverenciado como o criador da Mecânica dos Solos, que assumiu o papel de projetista e consultor da obra [1].

O emprego direto do solo residual tropical exigiu a superação das vulnerabilidades técnicas próprias desse material no estado inalterado, demandando atenção rigorosa quanto ao risco de geração de elevadas poropressões decorrentes de uma compactação acima da umidade ótima, fator agravado pelas severas condições pluviométricas da região. Apesar das limitações iniciais apontadas e do comportamento peculiar que diferia das teorias tradicionais da época, a matriz tropical remoldada e compactada provou possuir virtude mecânica salvadora, adquirindo ganhos expressivos de resistência ao cisalhamento e estabilidade sob as condições de contorno impostas [1, 5].

Este artigo apresenta visão sobre os solos tropicais e uma revisitação à análise do comportamento geotécnico da Barragem Terzaghi após mais de 70 anos de contínua operação.

2. GÊNESE PEDOGENÉTICA E ALTERAÇÃO DA PERMEABILIDADE

Seja em materiais de gênese autóctone ou alóctone, a pedogênese em ambientes tropicais atua de forma profunda e acelerada sobre as rochas, impulsionada pelas altas temperaturas e elevados níveis precipitação. A Figura 1 revela um retrato da estratificação de um material autóctone, cujo grau de intemperismo exerce efeitos sobre as propriedades físicas do solo (índice de vazios, compressibilidade e resistência) além do acúmulo de sesquióxidos (óxidos na proporção de 2 átomos do elemento para 3 átomos de oxigênio e.g. Al_2O_3 e Fe_2O_3) de ferro e alumínio (hematita, goethita e gipsita) [6, 7]

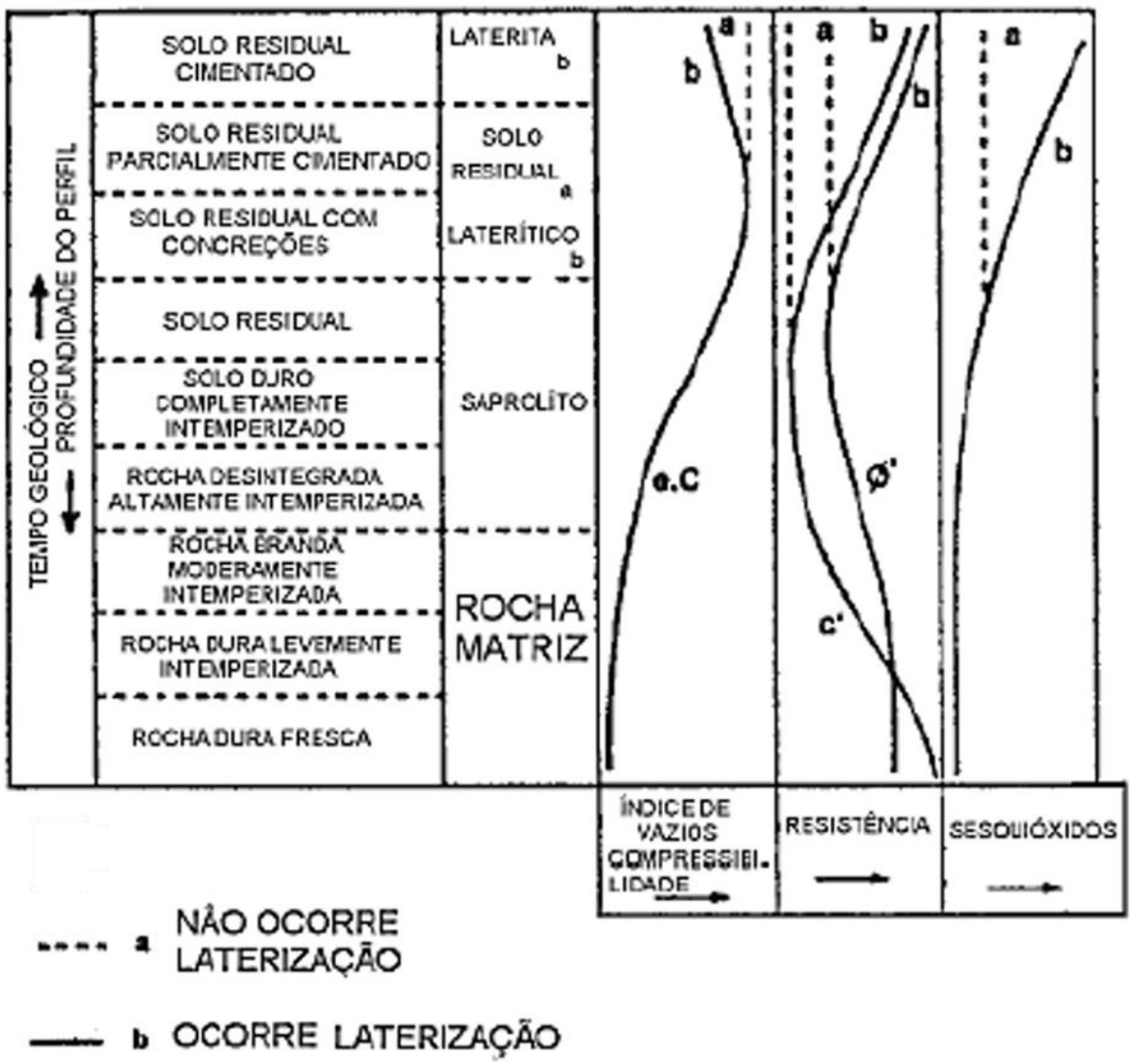


Figura 1 - Mudanças ocorridas no perfil de intemperismo, Sandroni (1985) apud Silva (2015) *[8]*

Esse intemperismo químico intenso gera perfis de solo com horizontes distintos, cujas características físicas, químicas e mineralógicas afetam diretamente o seu comportamento quando compactados para a construção de barragens de terra [9], [10], [11]. Nesse contexto, torna-se fundamental compreender as principais classes de solos, incluindo os solos lateríticos, saprolíticos, de transição, expansivos e os solos transportados, bem como suas características e relação na construção de barragens. A Figura 2 expõe um perfil de intemperismo bastante didático.

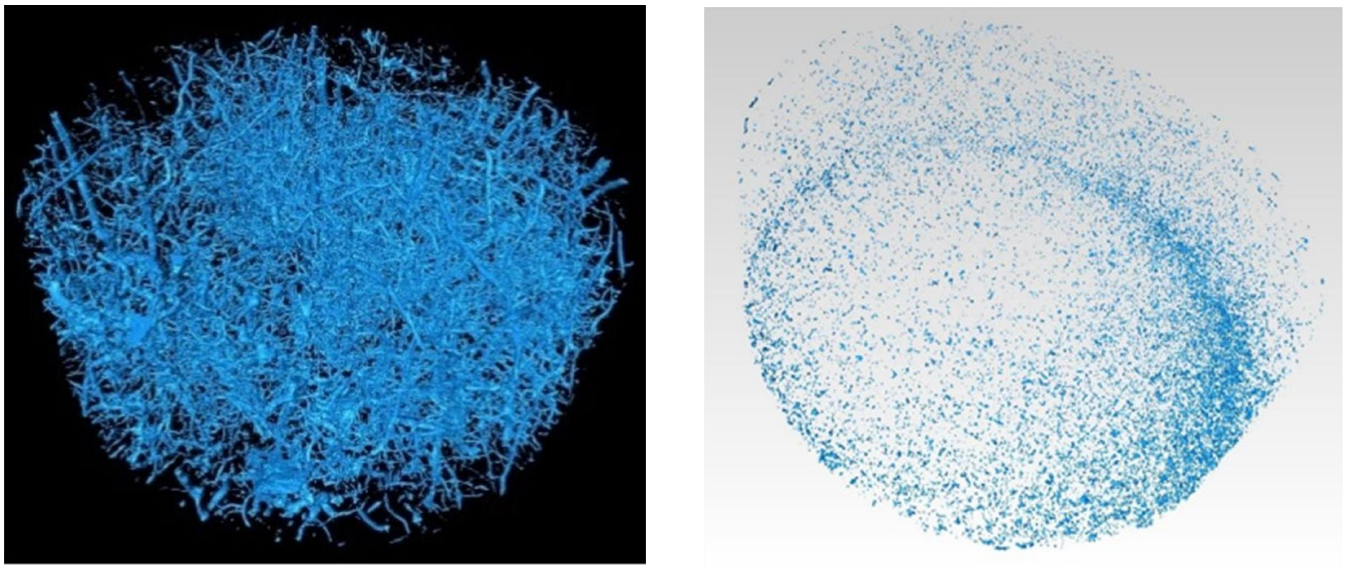


Figura 2 - Corte de maciço evidenciando o perfil de intemperismo

a) Solos Lateríticos ou Residuais Maduros

São solos maduros e altamente intemperizados, formados por processos de lixiviação intensa que resultam no acúmulo de sesquióxidos, esses óxidos atuam como agentes cimentantes, unindo as partículas de argila e silte [9], a esse processo se atribui o nome laterização.

- **Características:** Apresentam cor avermelhada característica, essa estrutura agregada cria uma porosidade bimodal, com macroporos (entre os agregados) e microporos (dentro dos agregados) [7].
- **Considerações relacionadas a Barragens:** Durante a compactação para formar o maciço da barragem, a energia mecânica fecha predominantemente os macroporos, enquanto os microporos no interior dos agregados permanecem praticamente inalterados, nesse contexto são frequentemente utilizados nos núcleos impermeáveis e aterros das barragens porque, após a compactação, adquirem baixa compressibilidade, alta resistência ao cisalhamento e baixa permeabilidade [1]. A Figura 3 mostra uma comparação visual, oriundo da digitalização de uma amostra intacta e uma compactada, uma redução do raio máximo dos poros na ordem de 77% [12].



a) b)

Figura 3 - Representação distribuição de poros em a) amostra intacta; b) amostra compactada. Adaptado de Wei et al. (2022) [12]

b) Solos Saprolíticos ou Residuais Jovens

Resultam do intemperismo físico e químico da rocha subjacente, preservando frequentemente a estrutura reliquiar e descontinuidades da rocha mãe [13, 14].

- **Características:** Possuem minerais menos alterados e propriedades mecânicas que podem variar significativamente dependendo da profundidade e da rocha de origem [15, 16]. Ao contrário dos lateríticos, as partículas dos solos saprolíticos encontram-se individualizadas ou em pacotes (lamelares) [2], nesse estado natural são bastante erodíveis. Quando compactados, especialmente no ramo úmido (com excesso de água), essas partículas tendem a se orientar, gerando uma estrutura dispersa
- **Considerações relacionadas a Barragens:** A preservação da estrutura reliquiar incide em uma elevada anisotropia, fazendo com que a permeabilidade horizontal seja significativamente maior que a vertical, o que é indesejável para o núcleo de uma barragem. Além disso, a presença de descontinuidades herdadas da rocha matriz e a falta de cimentação tornam esses solos altamente suscetíveis à erosão interna (*piping*) com a formação de caminhos preferenciais de percolação.

c) Solos de Transição

Apresentam características intermediárias entre os horizontes lateríticos e saprolíticos [17]. Em projetos de barragens, o mapeamento preciso desses solos é crucial, pois suas propriedades de permeabilidade e resistência podem mudar drasticamente ao longo do perfil de escavação [18] [19].

d) Outras Formações Tropicais Específicas

- **Solos Expansivos:** A depender da rocha de origem e do grau de alteração (especialmente em climas com estações secas prolongadas), podem se formar argilominerais expansivos do tipo 2:1, e.g. montmorilonitas. São geralmente evitados em aterros de barragens devido à sua alta instabilidade volumétrica e perda de resistência quando saturados [20, 6].

Os solos tropicais em seu estado natural costumam ser não saturados e estruturalmente porosos. A resistência aparente desses solos naturais é muitas vezes garantida pela sucção matricial [8], como mostrado na Figura 4.

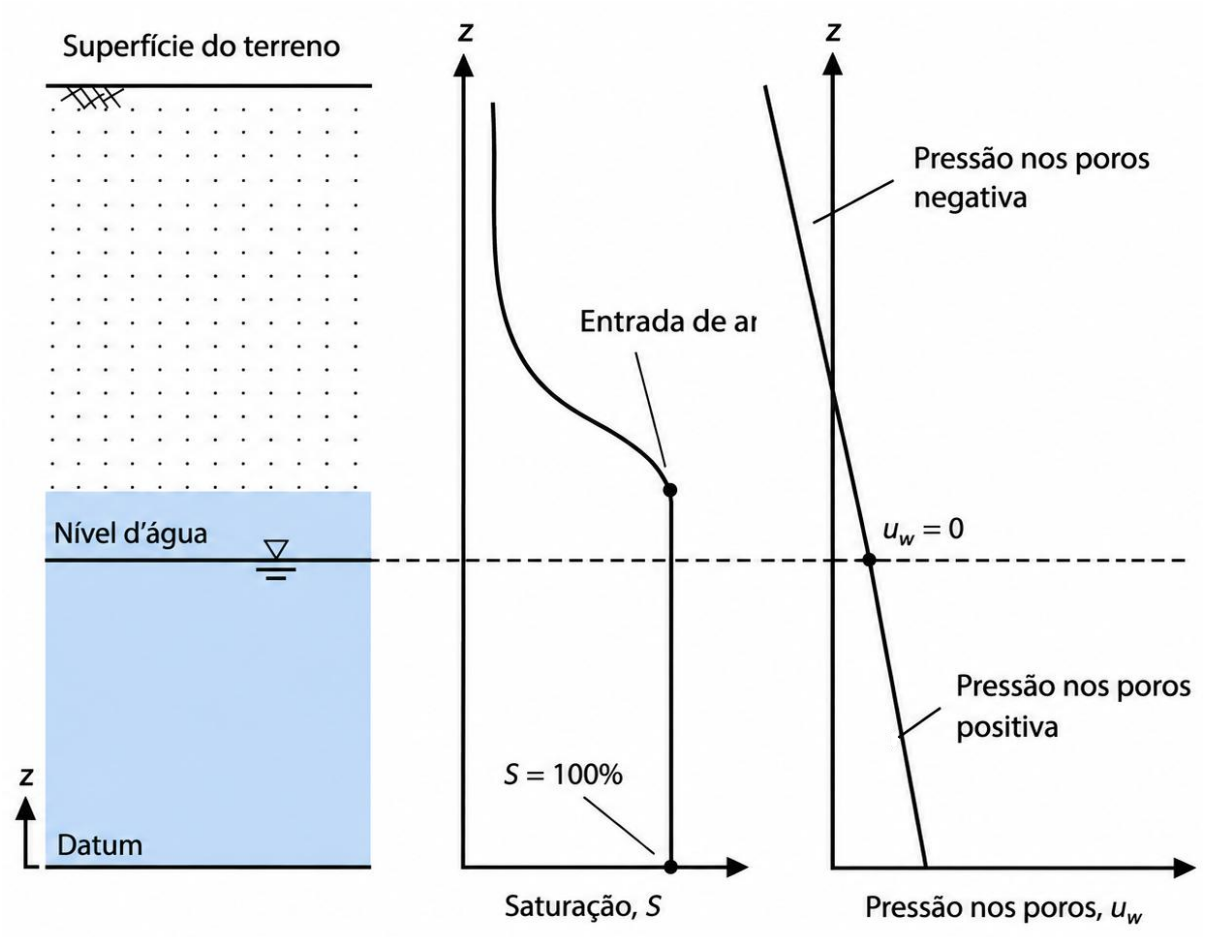


Figura 4 - Representação da variação de pressão nos poros ao longo do perfil de solo, sendo a sucção indicada quando há pressão negativa nos poros. Adaptado de Lu e Likos (2004) [21]

Como a pressão passa a ser negativa em relação à pressão atmosférica devido à meniscos formados nas interfaces ar-água dentro dos poros, essa sucção matricial confere uma coesão aparente que desaparece após a saturação completa do solo [22] [23].

Ainda, a sucção é dependente da dimensão do grão de solo e quando compactado apresenta menor retenção de água devido à diminuição acentuada dos macroporos da estrutura original, o que reduz a capacidade de armazenamento capilar em comparação ao seu estado de ocorrência natural, conforme explicam Gerscovich e Sayão (2002), e ilustrado na Figura 5 [22].

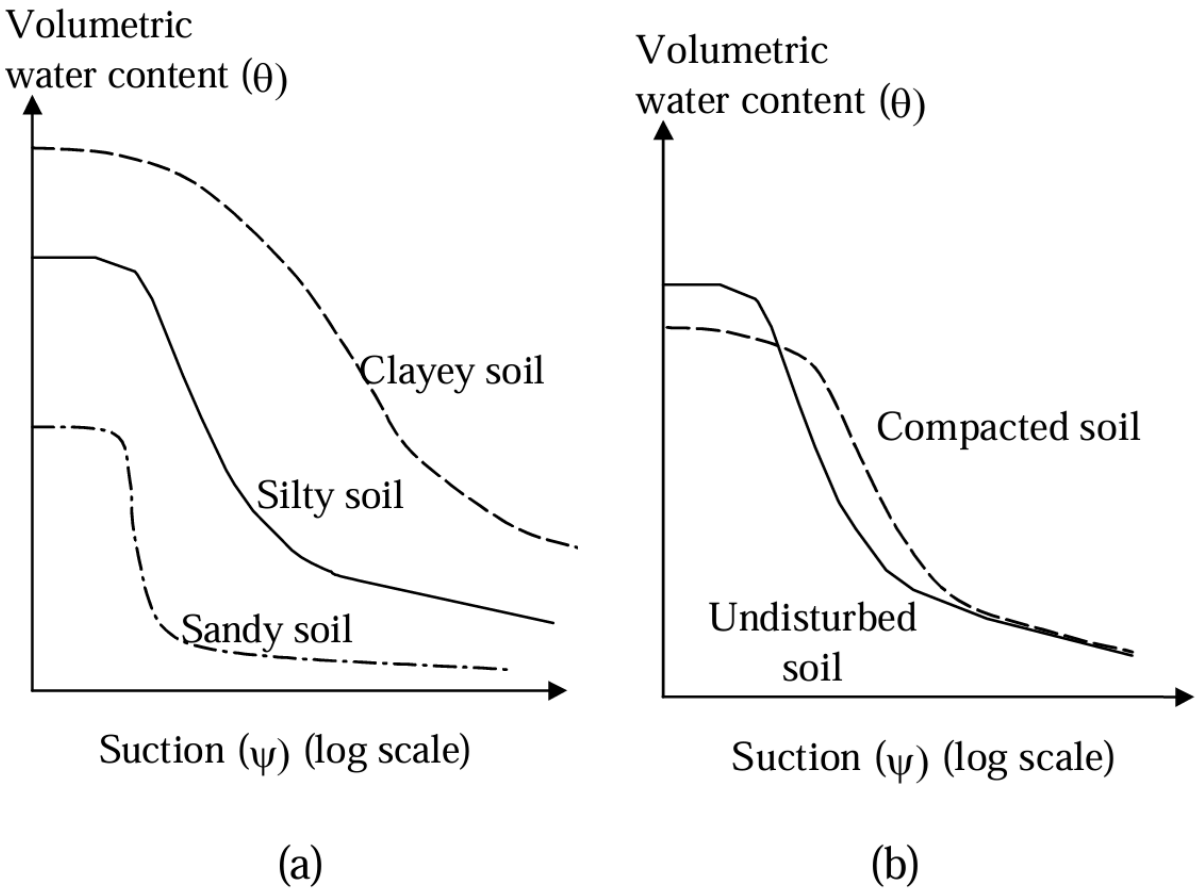


Figura 5 - Curvas típicas de retenção solo-água: (a) Influência da distribuição granulométrica; (b) Influência da estrutura do solo. Gerscovich e Sayão (2002) [22]

c) Solos transportados

Os solos alóctones, coluvionares (transportados por gravidade) e aluvionares (depositados por ação fluvial), diferem dos residuais pela gênese alóctone, sem intemperismo in situ profundo, e são classificados pelo agente de transporte predominante, resultando em elevada heterogeneidade granulométrica e estratificação conforme sua deposição [24, 25].

Características: Nos coluvionares, a heterogeneidade decorre do transporte em massa por processos gravitacionais, gerando variabilidade em sua composição, presença de blocos e estratificação irregular; nos aluvionares, exibem classificação granulométrica bem definida pelo agente fluvial dominante, com suscetibilidade elevada à anisotropia devido à deposição laminar e ordenação preferencial das partículas, o que agrava riscos de segregação [2, 11].

Considerações relacionadas a Barragens: Usados em aterros de ensecadeira pela disponibilidade, requerem triagem para remover partes orgânicas e permeáveis excessivas. Também, é comum sua utilização em filtros e transições, após a triagem da granulometria.

Cabe destacar entre os solos transportados, colúvios colapsíveis. Em seu estado natural, apresentam resistência decorrente da cimentação intergranular e da sucção matricial, sustentada por uma estrutura de macroporos. Entretanto, tornam-se susceptíveis a colapso estrutural sob saturação, fenômeno dependente do nível de tensões aplicadas. O colapso, pouco expressivo sob pressões muito baixas ou muito elevadas, atinge sua magnitude máxima sob condições intermediárias de carregamento [26].

3. ESTUDO DE CASO: BARRAGEM TERZAGHI

Como discutido acima, a utilização de solos residuais na construção de grandes barragens de terra, exemplificada pelo histórico estudo de caso da Barragem de Terzaghi, exige uma abordagem técnica que compreenda as características singulares ditadas pelo perfil de intemperismo e pedogênese das jazidas. Diferentemente dos materiais sedimentares de clima temperado, o solo residual de gnaisse empregado nessa barragem exibe um comportamento peculiar. No estado natural inalterado, o horizonte abriga macroporos que lhe conferem condutividades hidráulicas relativamente altas, da ordem de 10^{-4}m/s a 10^{-5}m/s, a Figura 6 mostra a jazida utilizada para a construção do aterro da barragem. Contudo, a solução técnica de escavação e compactação destrói essa macroestrutura reliquiar, transformando o material remoldado em uma matriz silto-argilosa com uma drástica queda de permeabilidade, para a ordem de 10^{-8}m/s [1].



Figura 6 - Jazida de material do aterro – Morro 1. (Neves, 2018) [1]

Durante a construção da barragem, o projetista Karl Terzaghi alertou para a vulnerabilidade desse material quanto às condições do clima, destacando a alta compressibilidade e alto o risco de geração de elevadas poropressões, caso o solo

fosse compactado com excesso de água (acima da umidade ótima). Para contornar esse desafio, e após várias falhas na construção para manter a umidade abaixo da ótima, foi adotado na obra um controle rígido das condições de compactação frente às chuvas tropicais, com monitoramento constante e remoção de camadas com umidade elevada [1].

Apesar dos grandes desafios construtivos, a matriz tropical compactada revela virtudes. O esqueleto siltoargiloso bem compactado mobiliza um excelente valor de ângulo de atrito, com expressiva resistência ao cisalhamento, garantindo uma estabilidade estrutural acima da prevista pelos métodos clássicos da época. A classificação do *U.S. Bureau of Reclamation,* vigente em 1947, separava os solos em 12 categorias, sendo a décima segunda a pior que o solo ainda pode ser utilizado. O solo residual de gnaisse utilizado por Terzaghi nessa barragem era classificado como **categoria 11**, sendo considerado um péssimo material ainda aceitável para construção, pois apresentava permeabilidade baixa e o risco de acúmulo de poropressão durante a construção [1].

Para viabilizar o uso seguro desse material e evitar falhas estruturais, Terzaghi determinou que os solos residuais tropicais devem ser obrigatoriamente combinados a sistemas robustos de filtros e drenagem interna, mostrado na Figura 7. A técnica englobou a instalação de um filtro vertical e um tapete horizontal feitos com solos transportados (areia lavada) ou gnaisse britado, com especificações rigorosas de granulometria para garantir o escoamento. Esses sistemas de drenagem são fundamentais para aliviar poropressões e interceptar qualquer fluxo através de eventuais trincas no solo compactado abaixo da umidade ótima, anulando os riscos de *piping* (erosão interna).

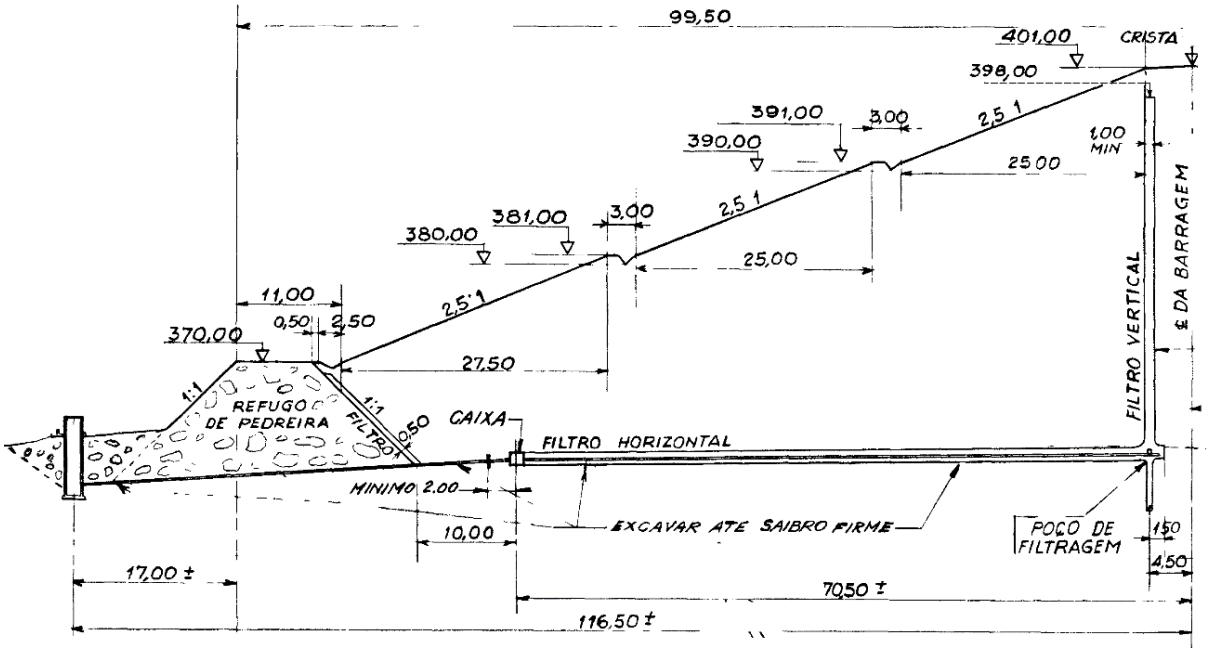


Figura 7 - Seção principal da Barragem de Terzaghi, expondo o sistema interno de drenagem. Neves (2018) [1]

A Figura 8 revela o aspecto da obra, na porção esquerda da imagem é possível identificar o filtro vertical e a direita e corpo do aterro compactado com rolo pé de carneiro. Destaca-se, ainda, que foi executada uma trincheira na ombreira, visível na imagem, propositalmente escavada para garantir o encaixe do filtro vertical contra a fundação



Figura 8 - Vista para a ombreira direita, à esquerda, execução do filtro vertical. (Neves, 2018) [1]

A resiliência dessa solução foi comprovada após mais de sete décadas de operação da barragem, avaliada frente ao acúmulo de uma maciça carga de assoreamento na face de montante, ensaios de carga variável mostraram permeabilidade desse material na ordem de 10^{-7}m/s [1]. Simulações por elementos finitos considerando o carregamento do assoreamento aplicado ao longo da operação da barragem e calibrado com dados de campo evidenciam que essa camada de sedimentos não afetou negativamente a estrutura [1], A Figura 9 ilustra a carga de assoreamento.

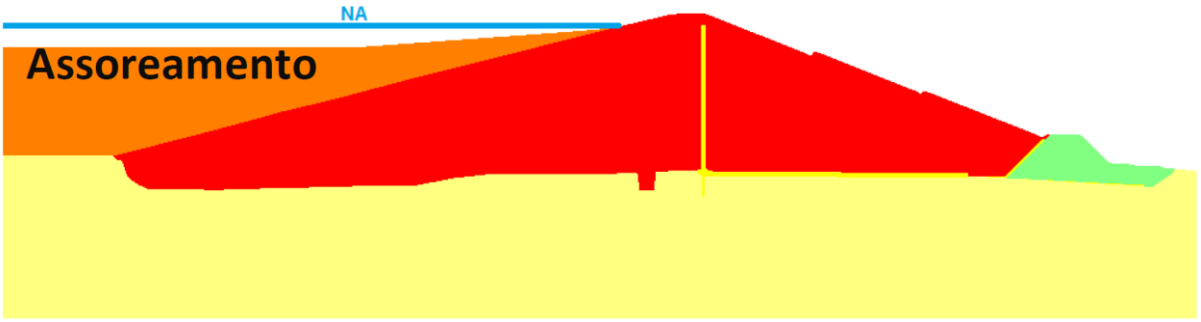
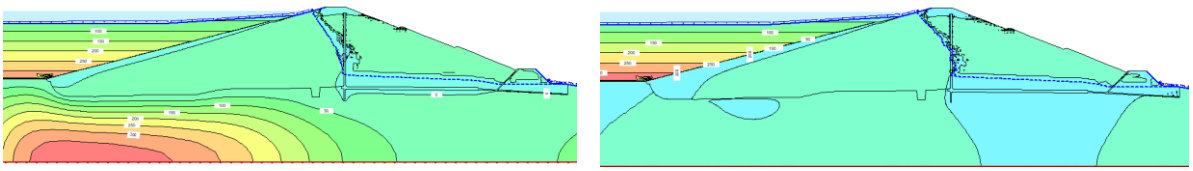


Figura 9 - Seção típica da Barragem de Terzaghi com detalhe da carga de assoreamento, com uma espessura de cerca de 30 metros. Neves (2018) [1]

O assoreamento não interferiu nas poropressões no corpo do aterro (verificado com os dados históricos e pelas simulações) exposto na Figura 10, já a percolação de água através do núcleo diminuiu, conforme mostrado na Figura 11. Verificou-se portanto, que os solos residuais tropicais, quando compreendidos em sua essência e combinados a eficientes sistemas de filtros de transição e drenagem interna, constituem materiais resilientes e estruturalmente seguros a longo prazo.



a) b)

Figura 10 - Excesso de poropressão a) em 65 anos, e b) em 200 anos. Neves (2018) [1]

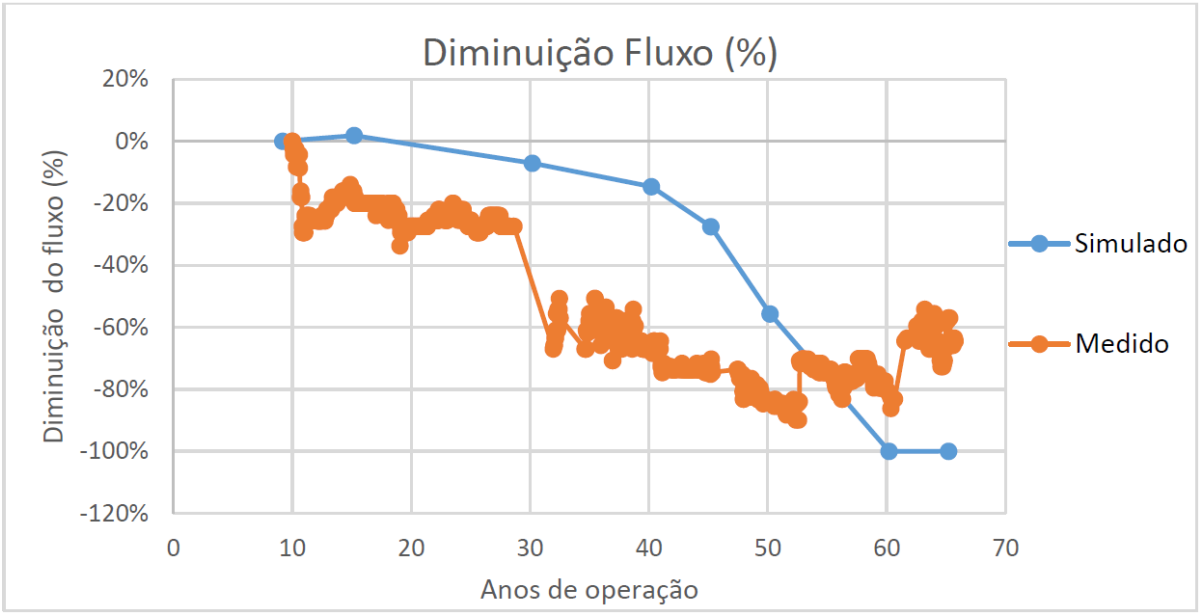


Figura 11 - Diminuição da percolação ao longo do tempo (Neves, 2018) [1].

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho verifica-se que os sistemas clássicos de classificação, como as categorias do USBR, são insuficientes para avaliar solos tropicais. Materiais que, por esses critérios seriam rotulados como "altamente compressíveis" (como o solo de categoria 11 da Barragem de Terzaghi) demonstraram na prática desempenho adequado após compactação criteriosa [10, 1]. A discrepância ocorre porque tais métodos negligenciam a pedogênese e a cimentação por sesquióxidos de ferro e alumínio, típica dos solos lateríticos [6, 7]. Então, a pedogênese tropical define se o solo terá um comportamento isotrópico, ideal para barragens quando compactado adequadamente ou lamelar, expansivo e anisotrópico o que exige projetos criteriosos de filtros e drenos para evitar rupturas por *piping* e deformações excessivas. A compactação é, portanto, não apenas um adensamento físico, mas uma reorganização estrutural que confere estabilidade a solos originalmente porosos [6, 12].

O desempenho da Barragem de Terzaghi após 65 anos de operação é a prova testemunho definitiva da viabilidade desses materiais [1], a Figura 12 mostra as condições atuais da estrutura.



Figura 12 – Vista para a face jusante da Barragem Terzaghi

O sucesso do projeto de Terzaghi e a posterior formalização de métodos de classificação de solos tropicais mostram que a compreensão da influência da estrutura do solo é superior à simples classificação granulométrica. Para futuras obras de infraestrutura em regiões tropicais, a integração entre o conhecimento da pedogênese local e o controle rigoroso da estrutura remoldada do solo permanece como a solução robusta.

5. PALAVRAS-CHAVE

Barragem de terra; Permeabilidade; Solo Residual tropical; Assoreamento

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] B. NEVES, BARRAGEM DE TERZAGHI, UM MARCO DA GEOTECNIA: AVALIAÇÃO APÓS 65 ANOS DE OPERAÇÃO, Dissertação de mestrado: PUC-Rio, 2018.

[2] J. C. d. CARVALHO, “Prática da Engenharia Geotécnica no Contexto do Solos Tropicais,” 2021.

[3] M. C. P. AGUIAR, “Tropical Soils: Considerations on Occurrence and Characteristics and Studies in Brazil,” em *IntechOpen eBooks*, IntechOpen, 2022.

[4] B. NEVES e A. Sayão, BARRAGEM TERZAGHI: AVALIAÇÃO APÓS 65 ANOS, Comitê Brasileiro de Grandes Barragens CBDB, 2018 Revista Brasileira de Engenharia de Barragens Ano V nº7 FEVEREIRO 2019.

[5] P. T. d. CRUZ, “Lessons learnt from design and construction of dams in Brazil,” *Journal of Nepal Geological Society,* vol. 22, 2000.

[6] F. C. Townsend, “Geotechnical Characteristics of Residual Soils,” *Journal of Geotechnical Engineering,* vol. 111, nº 1, pp. 77-94, 1984.

[7] M. A. Oliveira, L. R. C. Campos, M. C. C. Branco, J. L. d. C. Borges, G. F. C. Lima, A. R. T. Machado e A. C. d. S. Bezerra, “Construction Processes Paradigm and Reinforcement Alternatives for Tailings Dam Soil,” *Journal of Environmental Protection,* vol. 14, nº 3, pp. 213-229, 2022.

[8] F. K. d. Silva, “Caracterização física e mecânica de solo residual de gnaisse por meio de ensaios de campo e laboratório - Santo Amaro da Imperatriz, Santa Catarina,” 2014.

[9] F. Massad, Escavações a céu aberto em solos tropicais, 2014.

[10] R. M. Fortes, J. V. Merighi e A. Zuppolini Neto, *Método das Pastilhas para Identificação Expédita de Solos Tropicais.*

[11] V. F. B. de MELLO, L. G. de MELLO, J. BURLAND, M. Jamiolkowski, H. Poulos, J. Mitchell, W. van Impe, D. Potts, G. Mesri, G. Sadowski, D. Carrier, P. Mazzoni, R. Quintanilha, E. Sasaki, E. Meirelles, A. C. Sobral, C. Wolle, J. Marzionna, W. Hachich, M. A. F. de Mello e L. B. de Mello Alessio, *COMPORTAMENTOS DE MASSAS DO SUBSOLO E DE MATERIAIS TERROSOS-PEDREGOSOS CONSTRUÍDOS: TALUDES, ATERROS, BARRAGENS, QUEBRA-MARES; PRIMÓRDIOS, QUESTIONAMENTOS, ATUALIZAÇÕES.*

[12] Y. Wei, Z. Yao, X. Chong, J. Zhang e J. Zhang, “Microstructure of unsaturated loess and its influence on strength characteristics,” *Scientific Reports,* vol. 12, nº 1, pp. 1502-1502, 2022.

[13] M. C. d. CASTRO, “Utilização de solos saprolíticos na construção de pequenas barragens de terra,” Universidade Federal do Ceará, 2013.

[14] E. L. Pastore, Maciços de solos saprolíticos como fundação de barragens de concreto gravidade. TESE DE DOUTORADO, SÃO CARLOS: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 1992.

[15] S. S. Salgado, “Proposta de um procedimento para parametrização geomecânica de saprólitos de filito via ensaios triaxiais,” 2025.

[16] I. Rocchi, M. R. Coop e M. Maccarini, “The effects of weathering on the physical and mechanical properties of igneous and metamorphic saprolites,” *Engineering Geology,* vol. 231, pp. 56-67, 2017.

[17] A. M. d. C. Santos, “Metodología de clasificacion en miniatura compactada tropical: 40 años,” *Contribuciones a las Ciencias Sociales,* vol. 17, nº 9, 2024.

[18] J. Patias, D. M. Fernandes e R. d. L. Rodrigues, “Mapeamento do perfil de solos residuais presentes no Canal da Piracema de Itaipu Binacional,” 2023.

[19] T. B. d. Silva, M. I. M. d. C. V. Bello e S. R. d. M. Ferreira, “Correlações das classes pedológicas com características geotécnicas aplicadas ao uso e ocupação do solo,” *Journal of Environmental Analysis and Progress,* vol. 5, nº 3, pp. 346-358, 2020.

[20] I. Gogo-Abite, “Slope Stability Of Laterite Soil Embankments,” *Journal of International Crisis and Risk Communication Research,* 2004.

[21] N. Lu e W. Likos, Unsaturated Soil Mechanics, vol. 4, JohnWiley&Sons, 2003, p. 0.

[22] D. M. S. Gerscovich e A. S. F. J. Sayão, “Evaluation of the soil-water characteristic curve equations for soils from Brazil,” 2001.

[23] A. C. Gil, “Comportamiento del suelo tropical peruano,” *Perfiles de Ingeniería,* vol. 12, nº 12, pp. 27-35, 2017.

[24] L. D. Wesley, “Influence of Structure and Composition on Residual Soils,” *Journal of Geotechnical Engineering,* vol. 116, nº 4, pp. 589-603, 1990.

[25] M. d. A. Figueiredo, A. F. D. C. Varajão, J. D. Fabris e I. S. Loutfi, “Aspectos Pedogeomorfológicos e Mineralógicos de uma Topossequência de Solos Gnáissicos no Complexo Bação – Quadrilátero Ferrífero, MG, Brasil,” *Pesquisas em Geociências,* vol. 29, nº 1, pp. 71-71, 2002.

[26] M. M. Futai, “Comportamento Colapsível de Solos Tropicais Brasileiros,” em *VII Congresso Nacional de Geotecnia*, Lisboa, 1996.

	**Bruno NEVES** Possui bacharelado em engenharia civil pela Universidade da Marília, especialização em Segurança de Barragens pela UFBA e Mestrado em Engenharia Civil pela PUC-Rio. Sua carreira se concentra em projetos alta complexidade, incluindo barragens, túneis, canais e usinas de energia. Presta serviços especializados de consultoria em engenharia e representa a Carpi no Brasil e no Cone Sul, conectando soluções globais de estanqueidade à segurança e desempenho de ativos para infraestrutura.
	**Alberto SAYÃO** Possui graduação e mestrado em Engenharia Civil pela PUC-Rio e doutorado em Engenharia Geotécnica na Universidade British Columbia (Canadá,1989), onde atuou como Prof. Visitante em 2000. Foi presidente da ABMS (Assoc. Bras. de Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica), de 2004 a 2008. Foi professor da PUC-Rio até 2024, tendo sido orientador de dezenas de teses de mestrado e doutorado. Atualmente é membro do Conselho Deliberativo do CBDB e atua como consultor em projetos geotécnicos, especialmente em segurança de barragens e encostas. Em 2011, foi eleito Membro Titular da ANE (Academia Nacional de Engenharia). É autor de dois livros e dezenas de artigos técnicos em periódicos e congressos.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS
TEMA SR.1
BELÉM – PA, 23 DE SETEMBRO DE 2026

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO RESIDUAL DE FILITO COMO ATERRO COMPACTADO E COMO FUNDAÇÃO DE BARRAGEM

Pedro DE CARVALHO THÁ
Engenheiro Civil, MSc - Intertechne Consultores

Gabriel Luís SIMÕES
Engenheiro Civil - Intertechne Consultores

Matheus ALVES GERINO
Engenheiro Civil - Intertechne Consultores

Jean Lucas DOS PASSOS BELO
Engenheiro Civil, DSc - Intertechne Consultores

Andrés Miguel GONZÁLEZ ACEVEDO
Geólogo, DSc – Intertechne Consultores

RESUMO

Solos residuais tropicais são frequentemente relacionados a barragens, podendo ser usados na construção dos aterros propriamente ditos, quando compactados, ou presentes na fundação. Ao ser utilizados como material do aterro, o solo perde a estrutura original e passa a apresentar comportamento mecânico dependente de características geotécnicas como plasticidade, granulometria, composição química, e das condições de compactação. Como elemento de fundação, o comportamento mecânico é bastante dependente da estrutura do solo. Atualmente, após os recentes acidentes com barragens de rejeito, vem sendo questionado, cada vez mais, o comportamento desses solos em condições de carregamento não drenado, como a mudança de comportamento entre dilatante e contrátil do material *in situ*, em função dos níveis de tensões aplicados, a ocorrência de perda de resistência pós pico e a compatibilização entre deformabilidades do aterro e fundação. Neste trabalho, apresentam-se dados referentes ao comportamento mecânico de um solo residual de filito, da região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, na condição *in situ* e compactada. Avaliam-se parâmetros de resistência e deformabilidade através de uma série de ensaios triaxiais não drenados, executados com tensões confinantes de até 2 MPa. Dentre os resultados, houve paridade de resistência entre o material *in situ* e compactado, ausência de efeito perceptível de quebra estrutural, tendência à dilatação para amostras profundas e contração inicial para superficiais, mas sem justificar preocupação com comportamento não drenado.

ABSTRACT

Tropical residual soils are often associated with dams, being used either as embankment construction materials when compacted or occurring in the foundation. When used as embankment material, the soil loses its original structure and begins to exhibit mechanical behavior dependent on geotechnical properties such as plasticity, grain size distribution, chemical composition, and compaction conditions. As a foundation element, however, the mechanical behavior is strongly dependent on the soil structure. In recent years, particularly following tailings dam failures, increasing attention has been given to the behavior of these soils under undrained loading conditions. This includes aspects such as the transition between dilative and contractive behavior of the in situ material as a function of stress levels, the occurrence of post-peak strength loss, and the compatibility between embankment and foundation deformability. This study presents data on the mechanical behavior of a phyllite residual soil from the Quadrilátero Ferrífero region, Minas Gerais, Brazil, in both in situ and compacted conditions. Strength and deformability parameters are evaluated through a series of drained and undrained triaxial tests performed under confining stresses of up to 2 MPa. The results indicate comparable strength between the in situ and compacted materials, no significant evidence of structural breakdown, a greater tendency for dilation in deeper samples and initial contraction in shallower ones, without indicating concern regarding undrained behavior.

1. INTRODUÇÃO

Solos residuais são formados por processos de intemperismo (físico, químico e biológico) sobre a rocha matriz. A depender do grau de intemperismo, podem ou não apresentar estruturas reliquiares. Em regiões tropicais, como é o caso do Brasil, obras de barragens de terra normalmente envolvem solos residuais. Quando não são utilizados como materiais de aterro, na forma compactada, estão presentes na fundação, em espessuras que podem variar de metros a dezenas de metros.

As características dos solos residuais diferem significativamente entre si, em razão do grau de intemperismo e das características da rocha matriz. Diante disso, a distribuição granulométrica, plasticidade, permeabilidade, rigidez e resistência são bastante variáveis.

De acordo com [1], o comportamento dos solos residuais é diferente do comportamento de solos sedimentares, sobre os quais desenvolveu-se boa parte dos conceitos da mecânica dos solos. Nos solos residuais, na condição *in situ*, o processo de formação geralmente não está associado a adensamento, de forma que o comportamento mecânico geralmente não pode ser relacionado ao histórico de tensões. Dessa forma, conceitos como pré-adensamento, via de regra, não se aplicam.

Quando utilizados como material de construção, os solos residuais são desagregados e compactados, perdendo a estrutura herdada da rocha mãe e passando a apresentar comportamento dependente do grau de compactação e do efeito de adensamento, conforme indicado por [2].

Em estruturas como barragens de terra, que podem atingir grandes alturas e acarretar tensões elevadas na fundação, a deformabilidade relativa entre aterro e fundação é um aspecto importante. Um grande contraste na deformabilidade entre aterro e fundação pode resultar em recalques diferenciais, resultando em trincas e problemas de desempenho.

Neste trabalho, avalia-se um solo residual jovem de filito, utilizado como material de construção para o aterro de uma barragem. O mesmo solo está presente na fundação.

São avaliados resultados de ensaios de caracterização (granulometria, limites de plasticidade, compactação) e triaxiais, realizados em blocos indeformados coletados na área, amostras tipo Denison coletadas em sondagens na região da fundação e em blocos indeformados coletados de um aterro experimental executado com o solo compactado.

2. CARACTERÍSTICAS DO SOLO RESIDUAL AVALIADO

O solo objeto do estudo é um solo residual jovem de filito, proveniente do Quadrilátero Ferrífero do estado de Minas Gerais. Na condição *in situ*, o solo exibe estruturas reliquiares, que não são mais observadas na condição compactada, conforme registros fotográficos apresentados na Figura 1: bloco indeformado (a), amostra do aterro compactado (b) e corpo de prova moldado a partir de amostra Denison (c).

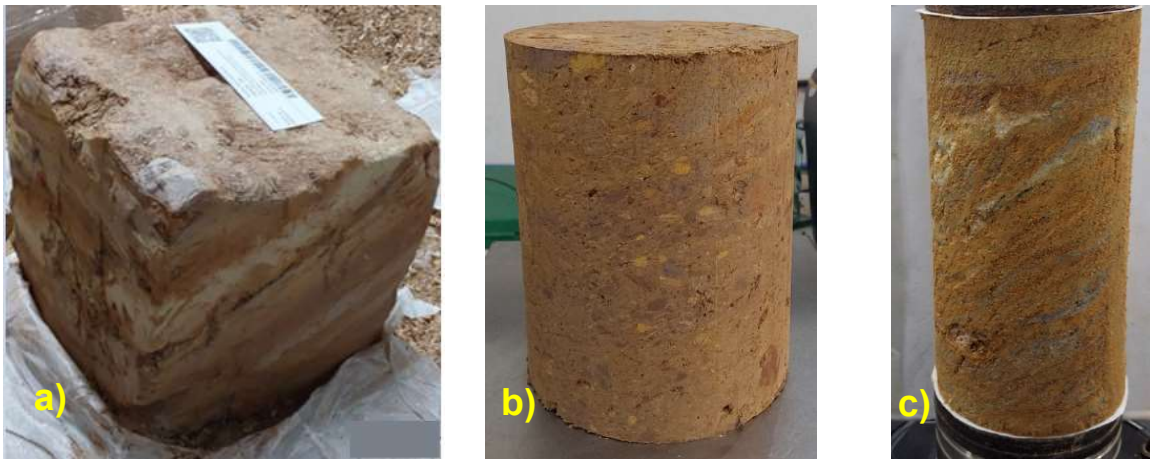


Figura 1 – Amostras solo residual de filito: (a) Bloco indeformado; (b) Amostra do aterro compactado; e (c) Amostra Denison

Em termos de granulometria, o solo pode ser classificado como um silte argiloso. A Figura 2 mostra as curvas granulométricas de amostras ensaiadas e a Tabela 1 o resumo dos ensaios de caracterização, incluindo a massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo para energia de Proctor Normal.

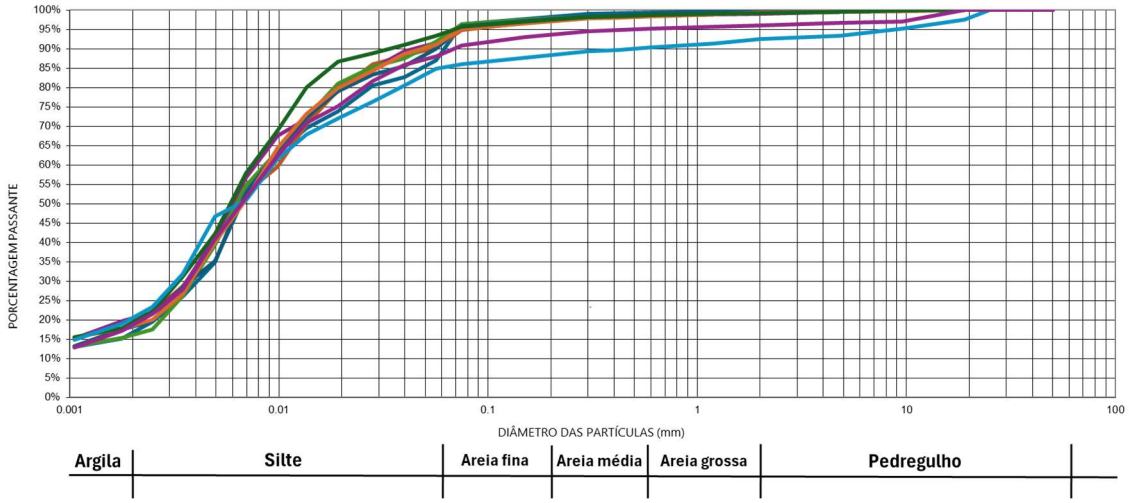


Figura 2 – Curvas granulométricas representativas do solo residual de filito

Tabela 1 – Resumo da caracterização do solo residual de filito

ρ_g (g/cm³)	LL (%)	LP (%)	$\rho_{s,máx}$ (g/cm³)	h_{ot} (%)
2,89	48	32	1,52	23,5

ρ_g – massa específica dos grãos;

$\rho_{s,máx}$ – massa específica seca máxima, energia de Proctor Normal;

h_{ot} – teor de umidade ótima.

2.1 Parâmetros de resistência

A resistência do solo residual na condição *in situ* foi avaliada através de uma série de ensaios triaxiais não drenados. Inicialmente, foram realizados ensaios em amostras indeformadas provenientes de blocos coletados em taludes naturais, em profundidades de até 1,5 m. Como o solo residual estudado preserva características da rocha matriz, foram realizados ensaios na direção topo-base do bloco, direção paralela à foliação e direção inclinada 45° em relação à foliação, de forma a avaliar possível anisotropia na resistência. As trajetórias de tensões efetivas obtidas nos ensaios não drenados são mostradas na Figura 3.

Os ensaios realizados nas amostras dos blocos apresentaram, no início da fase de cisalhamento, comportamento contrátil e posteriormente, com o aumento da deformação, passaram a apresentar dilatância. Percebeu-se também que, em duas das amostras adensadas em 1200 kPa, não houve dilatância. Esse comportamento suscitou dúvidas quanto ao comportamento do solo para altas tensões.

O comportamento apresentado nos ensaios realizados nos blocos sugeriu que, para tensões entre 1000 e 1200 kPa, poderia haver a quebra da estrutura do solo residual, o que estaria relacionado à tensão de fluência, conforme indicada por alguns autores como [3]. No entanto, esse comportamento também poderia ser decorrente do maior grau de intemperismo e maior índice de vazios das amostras coletadas superficialmente. Para avaliar esse possível efeito, foram coletadas amostras do tipo Denison em profundidades entre 4 e 7 m, em furos de sondagem. Foram então realizados ensaios triaxiais não drenados adensados para tensões efetivas de 400, 800 e 2000 kPa. As trajetórias de tensões obtidas nesses ensaios são mostradas na Figura 4. Nesses ensaios, todas as amostras apresentaram dilatância bastante elevada, sem nenhum indício de quebra de estrutura.

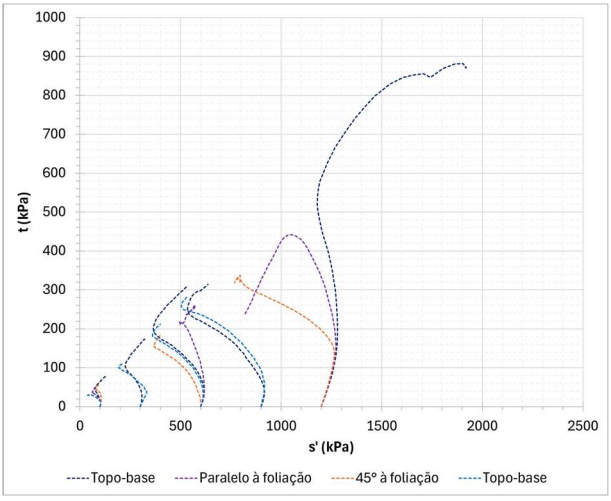


Figura 3 – Ensaios triaxiais CIU blocos indeformados *in situ* (amostras até 1,5 m de profundidade)

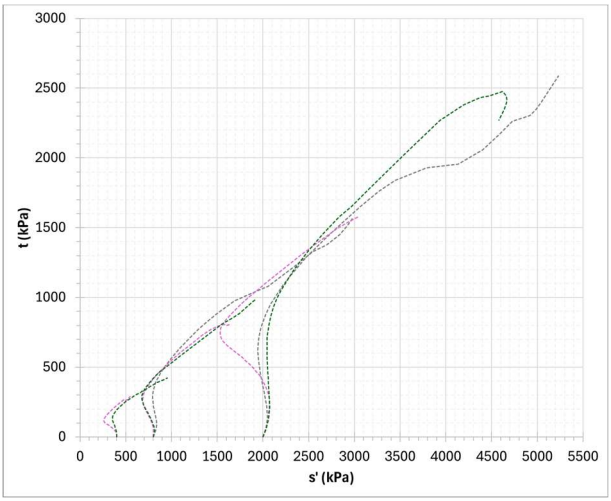


Figura 4 – Ensaios triaxiais CIU em amostras Denison (profundidade entre 4 e 7 m)

Em termos de envoltória de resistência, avaliando-a pelo critério de tensão desviadora máxima, para todo o conjunto de ensaios (amostras de blocos e amostras Denison), obteve-se ângulo de atrito efetivo de 30° e intercepto coesivo nulo. A Figura 5 mostra a envoltória de resistência obtida e os pontos de tensão desviadora máxima.

Para a condição compactada, a avaliação da resistência foi feita através de ensaios triaxiais não drenados realizados a partir de amostras indeformadas coletadas em um aterro experimental. O aterro experimental foi executado para avaliar a utilização de diferentes equipamentos de compactação, com diferentes números de passadas, tendo como objetivo o alcance do grau de compactação de 95%.

A Figura 6 mostra as trajetórias de tensão obtidas nos ensaios não drenados (a), assim como os estados de tensão para a condição de tensão desviadora máxima (b) para blocos com diferentes graus de compactação. Desses ensaios, verifica-se que o solo compactado, mesmo com grau de compactação de 95%, apresenta rigidez superior à da condição *in situ*, indicada por menor geração de poropressão nos ensaios. Também é possível perceber que variações no grau de compactação (apesar de terem sido pequenas nas amostras avaliadas), não resultaram em variações da posição da envoltória de resistência.

Ainda tratando de resistência, o ângulo de atrito obtido foi de 28° e a coesão de 12,5 kPa.

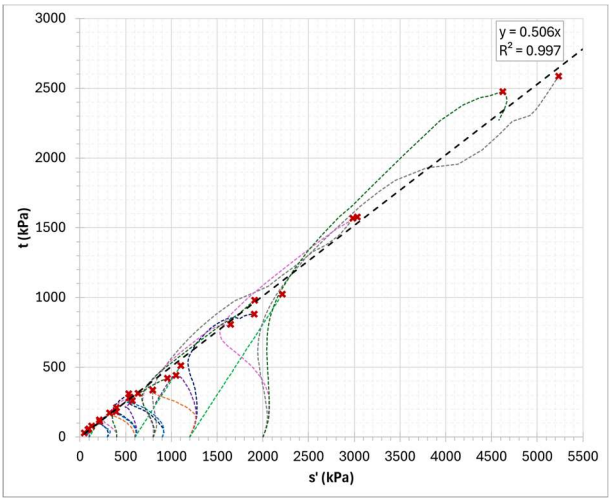
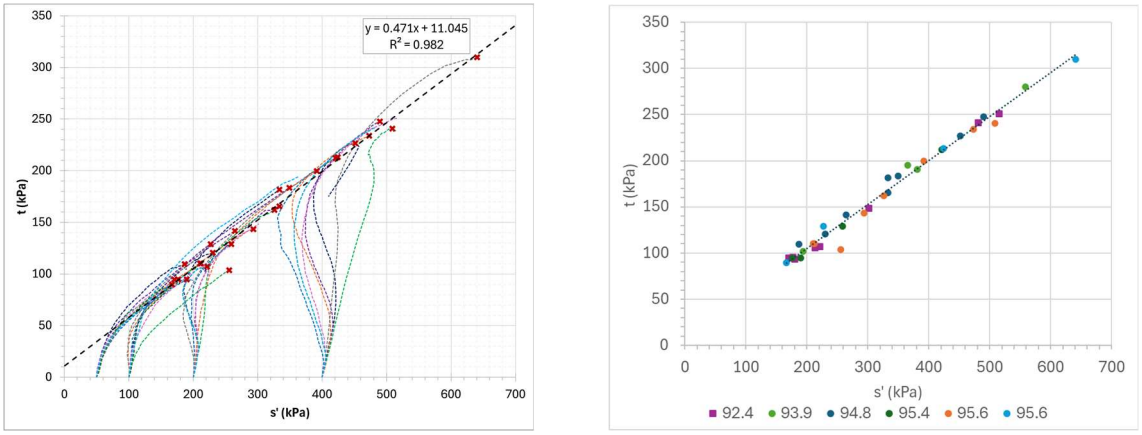


Figura 5 – Envoltória de resistência - amostras indeformadas



(a) Trajetórias de tensões (b) Desviadoras máximas por grau de compactação

Figura 6 – Envoltória de resistência - amostras compactadas do aterro experimental

2.2 Rigidez

A rigidez do solo foi avaliada através da calibração de parâmetros do modelo constitutivo *Hardening Soil with Small Strain* (HSS), que melhor representassem o comportamento global dos diversos corpos de prova ensaiados. As trajetórias de tensões da calibração são mostradas nas Figuras 7, 8 e 9, assim como os valores do módulo $E_{50,ref}$. A tensão considerada para definição do módulo de referência foi 100 kPa.

Verifica-se, nos resultados, que o solo compactado apresenta rigidez maior do que a do solo residual na condição *in situ*, quando avaliado o parâmetro $E_{50,ref}$. Essa diferença é basicamente resultante da diferença no comportamento tensão *vs*. deformação dos materiais. Na condição *in situ*, o solo apresenta uma dilatância bastante pronunciada, com aumento constante da tensão desviadora à medida que a deformação aumenta. Como o módulo E_{50} reflete a rigidez para deformação correspondente à metade da tensão desviadora de pico, a deformação correspondente a essa tensão é muito superior à deformação do solo compactado. As

Figuras 10 e 11 ilustram curvas típicas da evolução da tensão desviadora para o solo compactado e para o solo na condição *in situ*, respectivamente.

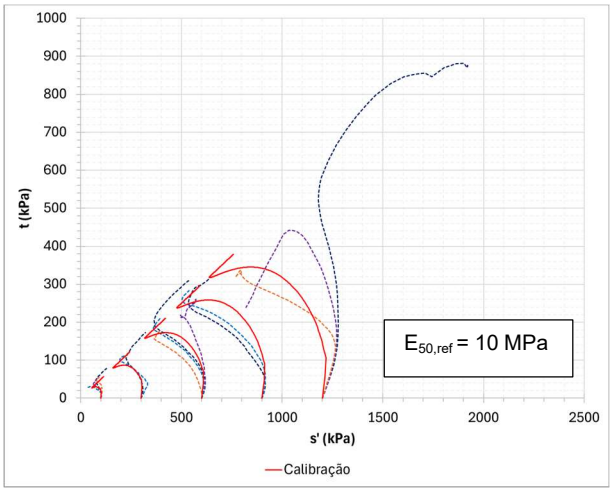


Figura 7 – Calibração - ensaios blocos *in situ*

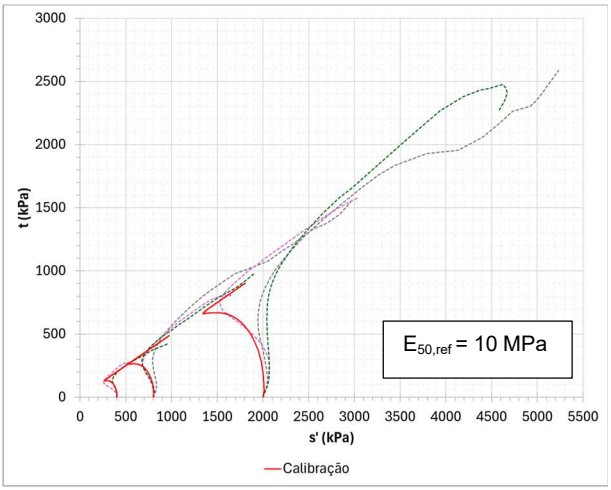


Figura 8 – Calibração - amostras Denison

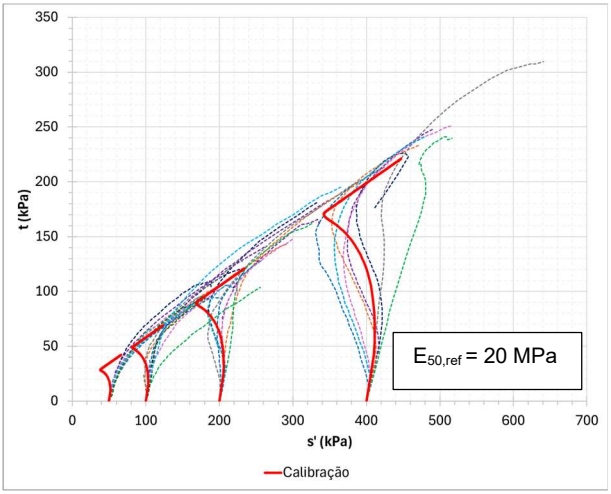


Figura 9 – Calibração - blocos do aterro experimental

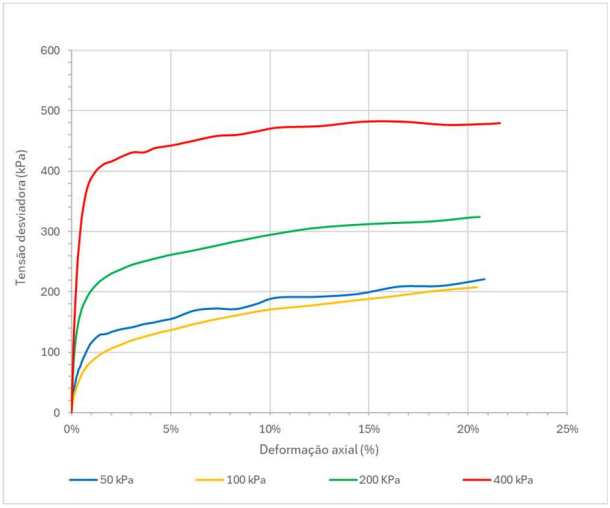


Figura 10 – Tensão desviadora *vs*. deformação axial - amostra do aterro experimental

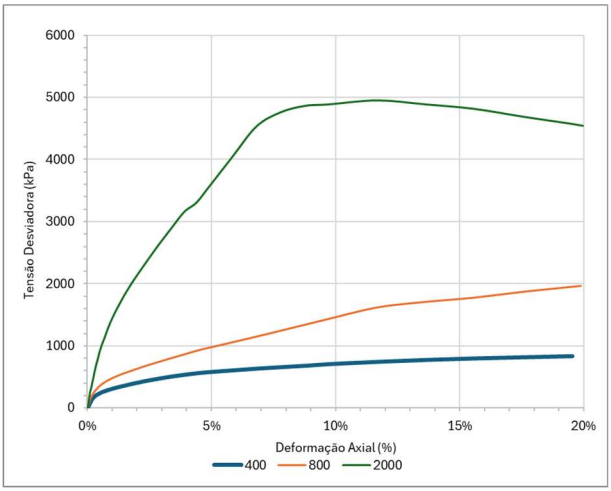


Figura 11 – Tensão desviadora *vs*. deformação axial - amostra Denison

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em termos de resistência na condição *in situ*, os ensaios realizados não indicaram anisotropia de resistência. Isto é, os parâmetros de resistência foram semelhantes, independente da direção do carregamento em relação à foliação. Os estados de tensões na condição de tensão desviadora máxima, assim como a envoltória de ruptura obtida, foram comparados com dados apresentados por [4], para solos residuais de filito do estado de São Paulo, conforme Figura 12. Comparou-se os resultados com dados de solos de São Paulo pela falta de referências específicas para a região do estudo. Do ponto de vista de envoltória, a resistência obtida encontra-se dentro da faixa apresentada por [4]. Observa-se, no entanto, uma diferença em termos de intercepto coesivo.

A envoltória de resistência obtida nos ensaios do solo residual de filito do Quadrilátero Ferrífero não indicou coesão, enquanto ensaios realizados em solos de São Paulo indicaram coesões entre 5 e 60 kPa. Essa diferença é devida ao comportamento

observado no solo do Quadrilátero Ferrífero, que apresenta dilatância bastante pronunciada.

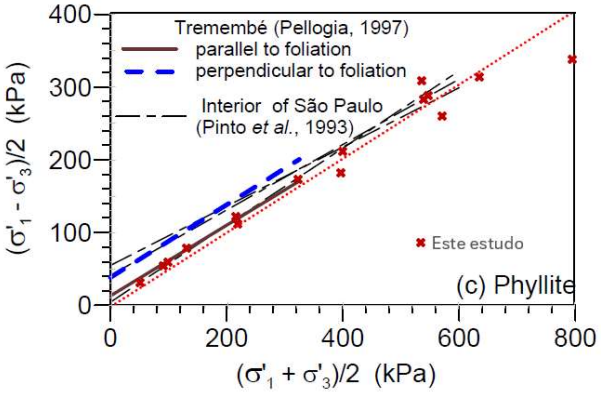


Figura 12 – Comparação da envoltória de resistência *in situ* com outros solos residuais de filito (Adaptado de [4])

Ainda em termos do comportamento observado nos ensaios triaxiais não drenados, considerando as amostras do solo do Quadrilátero, observou-se uma maior tendência de contração inicial nos ensaios realizados em blocos coletados superficialmente, enquanto os ensaios realizados nas amostras Denison indicaram comportamento predominantemente dilatante.

O mesmo padrão de comportamento foi observado por [5], em ensaios realizados com solo residual de gnaisse da região do Quadrilátero Ferrífero, como mostrado na Figura 13. Os ensaios realizados em blocos coletados superficialmente, com maior índice de vazios, resultaram em comportamento típico de solo normalmente adensado, com tendência de contração. Por sua vez, os ensaios realizados em amostras mais profundas, com menor índice de vazios, indicaram dilatação.

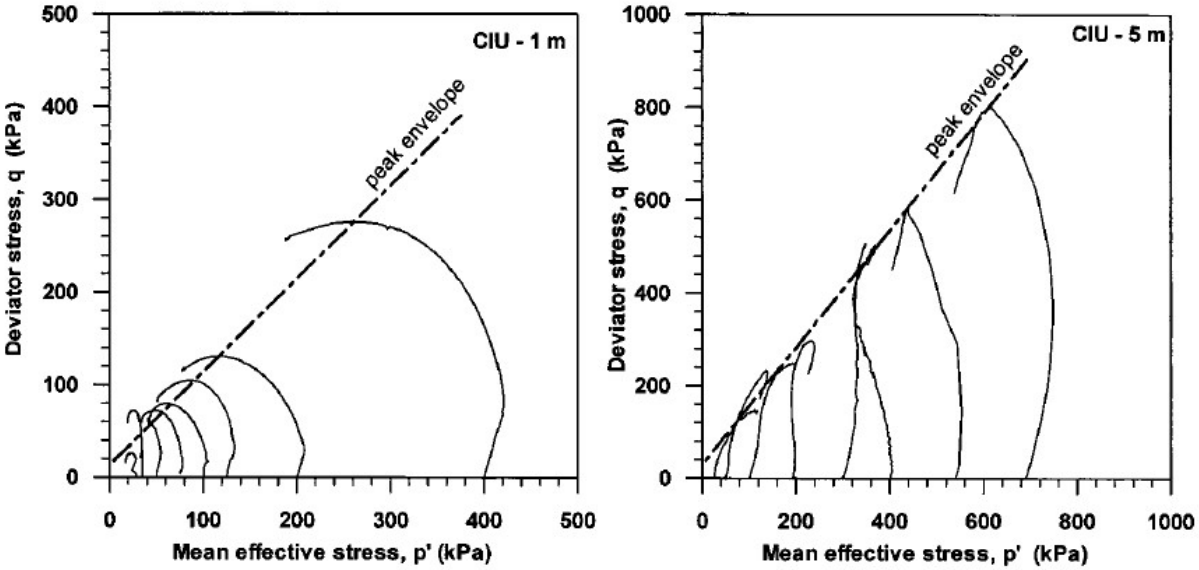


Figura 13 – Trajetórias de tensões de ensaios realizados em solo residual de gnaisse do Quadrilátero Ferrífero (Fonte: [5])

Para o solo do presente estudo, o índice de vazios médio das amostras dos blocos superficiais foi de 0,86, enquanto das amostras Denison foi de 0,55.

Em [5], também se avaliou o efeito de resistência do solo na condição indeformada (*in situ*) e na condição compactada, para o solo residual de gnaisse. Os resultados são mostrados na Figura 14. No estudo realizado, as amostras compactadas foram moldadas com o mesmo índice de vazios das amostras *in situ*. Para as amostras mais superficiais, em que não se observou influência de estrutura do solo residual, a envoltória de resistência foi a mesma. Para as amostras mais profundas, em que se observou influência de estrutura, as amostras *in situ* apresentaram resistência maior do que as amostras compactadas.

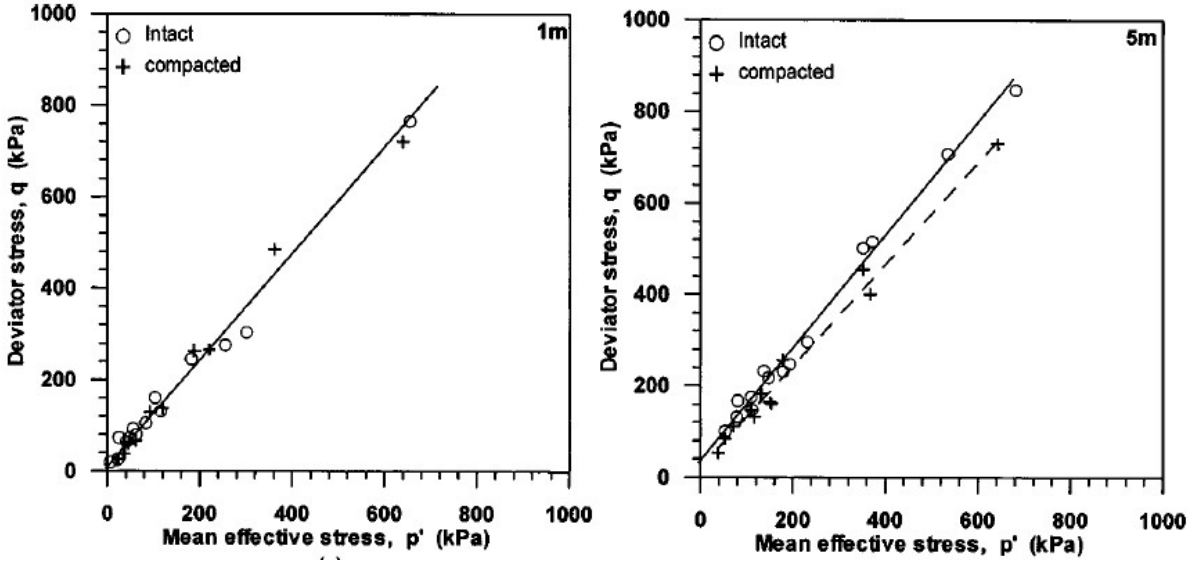


Figura 14 – Envoltórias de resistência para solo residual de gnaisse do Quadrilátreo Ferrífero na condição *in situ* e compactada (Fonte: [5])

Para o solo residual de filito avaliado neste estudo, houve uma pequena diferença nas envoltórias de resistência definidas considerando todos os estados de tensões avaliados, entre o solo na condição *in situ* e o solo compactado. A Figura 15 mostra a diferença entre as envoltórias considerando todos os níveis de tensões. No entanto, quando se observa a envoltória de resistência do solo na condição *in situ*, considerando menores níveis de tensões, equivalentes ao nível de tensões das amostras compactadas, obtém-se virtualmente a mesma envoltória de resistência, indicada na Figura 16. Nas amostras compactadas e amostras *in situ* ensaiadas em menores níveis de tensões, o ângulo de atrito obtido foi de 28° e a coesão de 12,5 kPa. Para a condição *in situ*, considerando todos os dados, obtém-se ângulo de atrito de 30° e coesão nula.

Com os dados disponíveis, não se verificou efeito de quebra de estrutura no solo residual, pois, mesmo para grandes tensões, os ensaios mantiveram comportamento com dilatância pronunciada. Credita-se a diferença de comportamento em diferentes níveis de tensões ao fato de a envoltória de resistência não ser linear e não exatamente a quebra de estrutura.

O efeito de quebra de estrutura poderia ser melhor avaliado por ensaios de adensamento odométrico. No entanto, dados desses ensaios, que estão programados, ainda não estão disponíveis.

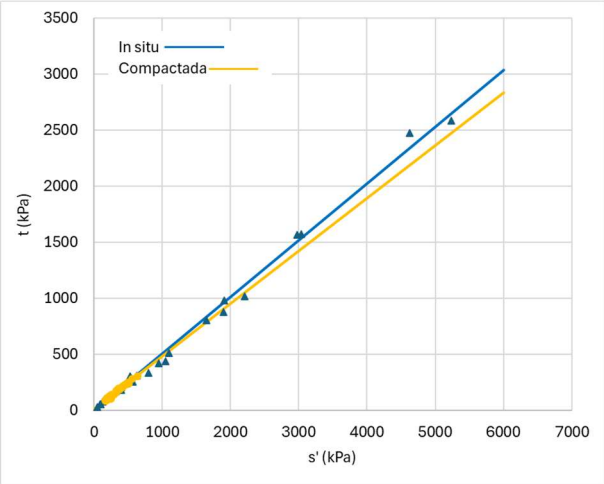


Figura 15 – Envoltórias do solo residual de filito - compactado e *in situ*

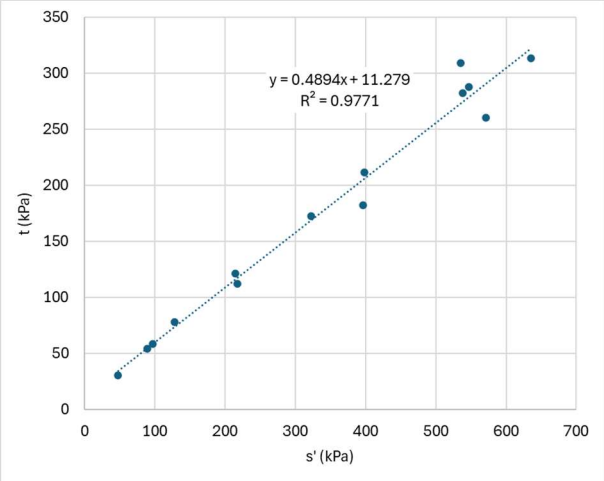


Figura 16 – Envoltória de resistência - amostras *in situ*, para menores níveis de tensões

Em termos de resistência não drenada, os ensaios realizados no solo residual de filito, na condição *in situ,* não apresentaram comportamento contrátil que justificasse preocupações com possível comportamento não drenado.

Em relação à deformabilidade, avaliou-se esse parâmetro do solo residual de filito através do módulo $E_{50,ref}$, calibrado para o modelo constitutivo HSS, a partir dos ensaios triaxiais. O valor obtido para as amostras compactadas indicou rigidez maior do que a obtida para a condição *in situ*. Conforme indicado no item anterior, credita-se essa diferença de rigidez mais ao formato da curva tensão *vs.* deformação do que a diferenças de estrutura do solo.

4. CONCLUSÕES

Foi avaliado o comportamento de um solo residual de filito, proveniente do Quadrilátero Ferrífero, a partir de ensaios triaxiais não drenados realizados em amostras indeformadas na condição *in situ* e indeformadas provenientes de um aterro experimental. No aterro experimental, as amostras foram compactadas com grau de compactação alvo de 95% do Proctor Normal. Os parâmetros de resistência obtidos

(Ø′= 28° e c’ = 12,5 kPa) se mostraram adequados para utilização do material como aterro de barragem. Não se observou variações na envoltória de resistência para grau de compactação variando entre 92% e pouco mais de 95%. Em termos de deformabilidade, o módulo obtido também se mostrou adequado.

Nas amostras na condição *in situ*, os ensaios triaxiais CIU foram realizados com tensões efetivas de adensamento variando entre 100 e 2000 kPa. O objetivo da realização de ensaios com tensões elevadas foi a avaliação de possível quebra de estrutura e mudança de comportamento. As amostras *in situ* foram coletadas em blocos superficiais (aproximadamente, 1,5 m de profundidade) e com amostrador Denison em profundidades entre 4 e 7 m.

Do ponto de vista de envoltória de resistência das amostras *in situ* do solo residual, foi possível verificar uma pequena não linearidade. Ainda, a envoltória das amostras na condição compactada coincidiu com a envoltória das amostras *in situ* ensaiadas com menores níveis de tensões, compatíveis com aqueles utilizados para os ensaios das amostras compactadas.

Não se observou mudança no comportamento das trajetórias de tensões das amostras *in situ* com o aumento da tensão efetiva de adensamento, não havendo, portanto, indicativo de quebra de estrutura. O que se observou foi que as amostras coletadas a maiores profundidades apresentaram maior tendência à dilatação, o que é explicado pelo fato destas amostras possuírem densidade maior.

O solo residual na condição *in situ* também se mostrou adequado (do ponto de vista de resistência e deformabilidade) como fundação de barragem, não indicando necessidade de tratamentos especiais. Considera-se necessária somente a remoção de material superficial com presença de matéria orgânica.

Em termos de rigidez, a maior rigidez observada nas amostras compactadas foi creditada à dilatância observada nas amostras *in situ*, que influenciou o valor de $E_{50,ref}$.

5. PALAVRAS-CHAVE

Solo residual de filito, solo compactado, comportamento mecânico, Quadrilátero Ferrífero.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Wesley, L. (2013). Residual Soils and the Teaching of Soil Mechanics. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris.

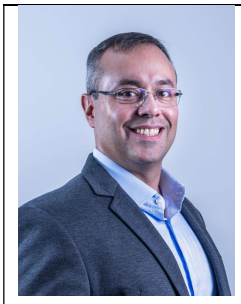
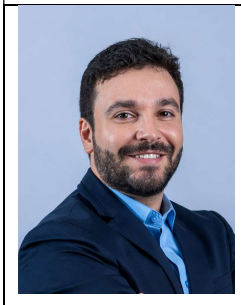
[2] de Mello, V. F. B. (1980). Comparative behaviors of similar compacted earthrock dams in basalt geology in Brazil. In Proceedings of the Symposium on Problems and Practice of Dam Engineering (Bangkok, Thailand, 1–15 December 1980).

[3] Blight, G., & Leong, E. (2012). Mechanics of Residual Soils, Second Edition. CRC Press; Taylor & Francis Group.

[4] Futai, M. M., Cecílio, M. O., Jr., & Abramento, M. (2012). Shear strength and

deformability of residual soils from the Sao Paulo metropolitan area. In A. Negro, M. Namba, V. L. Sanches, A. S. Dyminski, & A. C. M. Kormann (Eds.), Twin cities: Soils from Sao Paulo and Curitiba metropolitan areas (pp. 155–188).

[5] Futai, M. M., Almeida, M. S. S., & Lacerda, W. A. (2004). Yield, strength, and critical state behavior of a tropical saturated soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130*(11), 1169–1179.

	**Pedro DE CARVALHO THÁ** Graduado em Engenharia Civil (UFPR), possui mestrado em Geotecnia (PUC-Rio) e é aluno de doutorado no curso de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (UFPR). Possui mais de 20 anos de experiência em projetos de infraestrutura, envolvendo projetos de barragens de terra, enrocamento e concreto, aterros, escavações a céu aberto e subterrâneas e estruturas de contenção.
	**Gabriel Luís SIMÕES** Graduado em Engenharia Civil (UTFPR), é atualmente aluno de mestrado em geotecnia no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (UFPR). Possui 5 anos de experiencia na área de geotecnia, sendo 2 anos em laboratório de solos, com foco na execução e interpretação de ensaios geotécnicos. Atua no desenvolvimento de projetos de descaracterização de barragens e de aterros de estabilização.
	**Matheus ALVES GERINO** Graduado em Engenharia Civil (UP), é atualmente aluno de mestrado em geotecnia no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (UFPR). Possui 5 anos de experiência na área de geotecnia, incluindo acompanhamento de obra. Desse período, destaca-se a experiência de 2 anos no setor de mineração, com ênfase em estudos de ruptura hipotética e modelagem numérica.
	**Jean Lucas DOS PASSOS BELO** Graduado em Engenharia Civil (UEM), possui mestrado em Geotecnia (EESC-USP) e doutorado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica (ITA). Possui 10 anos de experiência em geotecnia, sendo 5 anos na mineração, com foco em projetos e pesquisas em confiabilidade geotécnica, auditoria de barragens, modelagem numérica, análise de risco e ruptura hipotética.



Andrés Miguel GONZÁLEZ ACEVEDO

Graduado em Engenharia Geológica (UCV) e Geólogo pela UFPR, possui mestrado em Engenharia de Construção Civil – Geotecnia (UFPR) e Doutorado em Geologia (UFPR). Possui 16 anos de experiência em projetos de engenharia, com foco em instrumentação e monitoramento geotécnico, mapeamento geológico, investigações geológico-geotécnicas e modelagem geológica de projetos.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS
TEMA SR.2
BELÉM – PA, 23 DE SETEMBRO DE 2026

EROSÕES INTERNAS EM BARRAGENS DE TERRA – CASO GRANJEIRO

Helton França CARNEIRO
Analista de Infraestrutura - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

Josimar Alves de OLIVEIRA
Especialista em Infraestrutura Sênior - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

Altair Maciel de BARROS
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

Jonas PERTUSATTI
Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

Rodolpho Rodrigues SOARES
Engenheiro Civil - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

RESUMO

O artigo faz uma abordagem dos fundamentos teóricos da formação de erosões internas em barragens de terra, com ênfase nos mecanismos de iniciação, continuidade e progressão desses processos. Esses aspectos são correlacionados às características geotécnicas da barragem e ao contexto geológico local, a partir de observações de campo, investigações geotécnicas e resultados de ensaios de campo e de laboratório. Com base nessa abordagem, busca-se compreender o mecanismo de falha associado ao incidente ocorrido em 2019, na barragem Granjeiro, localizada entre os municípios de Ubajara-CE e Ibiapina-CE, caracterizado por uma erosão na crista, de geometria circular, que se estendia por todo o lado de montante. Adicionalmente, o trabalho descreve as decisões e ações adotadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) durante a situação de emergência para contenção da anomalia, bem como as medidas implementadas para o restabelecimento das condições operacionais da barragem.

ABSTRACT

The article addresses the theoretical foundations of internal erosion formation in earth dams, with emphasis on the mechanisms of initiation, continuity, and progression of these processes. These aspects are correlated with the geotechnical characteristics of the dam and the local geological context, based on field observations, geotechnical

investigations, and the results of field and laboratory tests. Based on this approach, the study seeks to understand the failure mechanism associated with the incident that occurred in 2019 at the Granjeiro Dam, located between the municipalities of Ubajara, CE, and Ibiapina, CE, characterized by crest erosion of circular geometry extending across the entire upstream face. Additionally, the paper describes the decisions and actions adopted by the National Water and Sanitation Agency (ANA) during the emergency situation to contain the anomaly, as well as the measures implemented to restore the dam's operational conditions.

1. INTRODUÇÃO

A barragem Granjeiro, localizada entre os municípios de Ubajara-CE e Ibiapina-CE, no entorno das coordenadas 3°54'6,41"S e 40°57'15,71"O (*datum* SIRGAS 2000), é do tipo terra homogênea, com 13,56 metros de altura e crista com 6 metros de largura. Os taludes apresentam inclinação 1V:1,7H a montante e 1V:2H a jusante. O maciço está localizado sobre fundação em arenito e dispõe de trincheira vedante a montante (*cut-off*), sistema de drenagem interna do tipo tapete drenante na seção principal, com 50 cm de espessura e dreno de pé em enrocamento. Durante a construção foi executado um tapete impermeável de montante, que já não cumpria mais sua função. Ao final de 2018 e início de 2019, as vazões naturais, que ocorreram durante o período chuvoso na bacia, elevaram o nível do reservatório a menos de 1 (um) metro da cota da crista. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) recebeu denúncia que a barragem estava rompendo e ao chegar ao local se deparou com erosão na crista, em formato circular, que tomava todo o lado de montante.

2. O PROBLEMA OBSERVADO

A barragem Granjeiro não dispunha de inspeções regulares e não estava classificada quanto ao enquadramento na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) em 2019, e avaliações de mancha de inundação, realizadas pela ANA durante a emergência, indicaram Dano Potencial Associado (DPA) Alto para um volume reservado de 2,9 hm^3.

A barragem está situada nos domínios geológicos da Bacia Sedimentar do Parnaíba, no denominado Grupo Serra Grande, conforme mapa geológico apresentado na Figura 1, obtido no Mapa Geológico, Folha Frecheirinha (SA.24-Y-C-VI) na escala 1:100.000 da CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

ANA [1] destaca, conforme o mapa geológico regional, que a barragem Granjeiro se encontra em área de afloramento da Formação Tianguá, contudo, nas sondagens realizadas e vistorias de campo foi possível avaliar que a estruturação do arenito no local da barragem Granjeiro é bem marcada pela estratificação cruzada acanalada e planos sub-horizontais, com presença de uma camada de material mais fino de siltito ou argilito, provavelmente marcando episódios deposicionais mais e menos intensos, refletindo os eventos de cheia e estiagem durante a deposição desses sedimentos, o que leva a crer que, no âmbito da geologia local, estas rochas pertençam a Formação Jaicós.

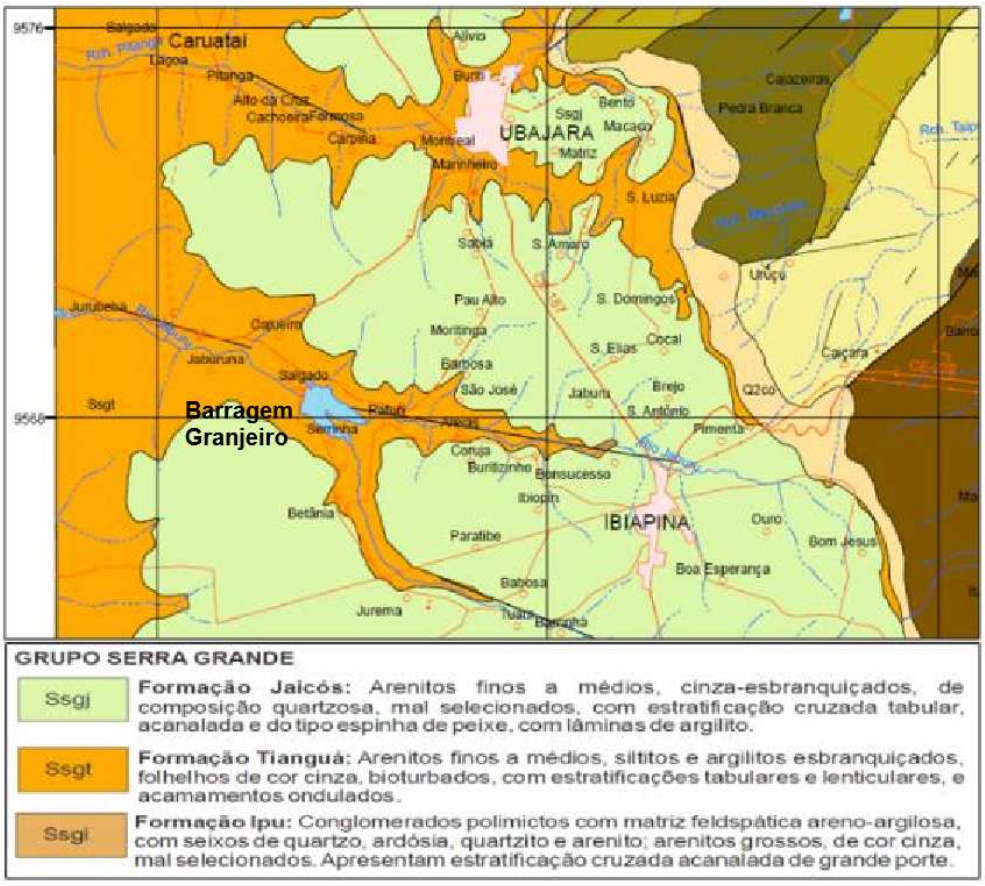


Figura 1 – Mapa geológico da região onde está localizada a barragem Granjeiro

Fonte: ANA [1].

A Figura 2 retrata a porção final do canal de restituição do vertedouro, onde se observam, nos degraus formados com face para jusante, a estruturação do arenito que se aflora na base do canal, caracterizada pela estratificação cruzada acanalada e planos sub-horizontais, delimitando pacotes de arenito com presença de siltito ou argilito, mais suscetível ao intemperismo e erosão.



Figura 2 – Detalhe da estruturação do arenito na base do canal de restituição do vertedouro, extraído do Relatório de Reconhecimento – Inspeção de Campo.

Fonte: ANA [2].

As informações da geologia regional e local foram obtidas a partir de consulta ao relatório de vistoria elaborado no âmbito do Contrato nº 037/2019/ANA.

A remoção do aterro da barragem, no local onde houve o incidente, realizada pelo empreendedor na intenção de tratar a fundação, revelou a presença de solo de coloração variegada a escura com pedregulho, de granulometria descontínua, localizada sobre o topo rochoso, na porção do eixo para jusante da barragem (Figura 3).

Essa camada, via de regra, e conforme observado, encontra-se sob o espaldar de jusante e é interceptada a montante pela trincheira impermeável. Essas observações foram confirmadas pelas análises realizadas a partir das sondagens realizadas pela ANA, nas quais se identificaram passagens de camada com presença de pedregulho grosso de cor amarela-acinzentada e de camada de solo, esta identificada como pertencente à trincheira impermeável (*cut-off*) a montante.

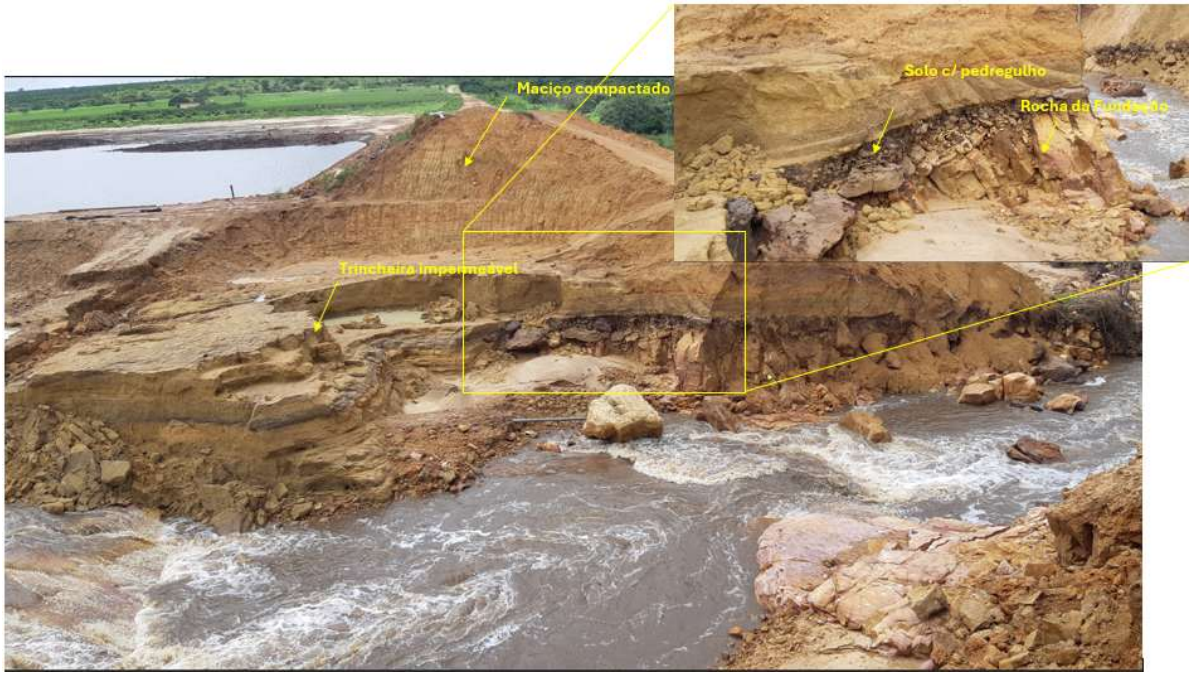


Figura 3 – Detalhe da seção da barragem no local da brecha e a estruturação das camadas superficiais da fundação.

Fonte: dos autores (2020).

A porção superficial da rocha da fundação, constituída por rocha medianamente alterada com espessura em torno de três metros, se apresenta medianamente coerente e intensamente fraturada, com sinais de alívio superficial (fraturas abertas e oxidação), tratando-se de uma zona de baixa qualidade geomecânica e possivelmente francamente permeável.

As Figuras 4 e 5 retratam afloramento exposto da rocha de fundação da barragem junto ao pé do talude direito da brecha escavada, nas quais se observam a ocorrência de fraturas sub-horizontais, marcando o acamamento do arenito, associadas a um reticulado de fraturas sub-verticais, com direções nos sentidos montante/jusante e longitudinal ao longo do eixo da barragem.

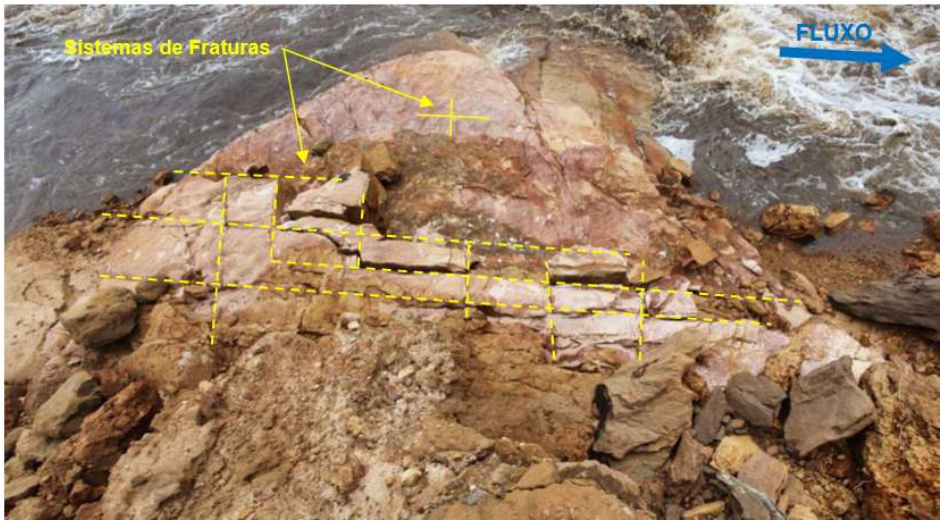


Figura 4 – Vista superior do sistema de fratura da rocha de fundação, extraído do Primeiro Relatório de Evolução das Anomalias.

Fonte: ANA [3].



Figura 5 – Vista frontal do sistema de fraturas da rocha de fundação, extraído do Primeiro Relatório de Evolução das Anomalias.

Fonte: ANA [3].

A informação obtida em campo era que, ao longo da operação da barragem, ocorria um fluxo concentrado de água, observado em surgência localizada a jusante, indicando um caminho preferencial de percolação pela fundação em arenito, além de vários outros pontos de surgência de menor vazão.

Após o incidente e vencida a situação emergencial, o empreendedor, na intenção de recuperar a barragem, construiu uma ensecadeira a montante, no intuito de manter a região ensecada, a fim de realizar, com mais facilidade, o tratamento da fundação com injeções de calda de cimento, antes de reconstituir o aterro. A área ensecada entre a barragem e a ensecadeira revelou a existência de uma série de cavidades a montante da barragem, indicando o carreamento do solo proveniente do tapete impermeável ao longo do tempo (Figuras 6 e 7).



Figura 6 – Vista para montante e a jusante da ensecadeira, com detalhe das cavidades formadas na região do tapete impermeável, as quais assemelham a uma superfície de um queijo suíço. Foto tirada de cima do aterro remanescente da barragem.

Fonte: dos autores (2019).



Figura 7 – Detalhe de cavidade observada na região do tapete impermeável de montante.

Fonte: dos autores (2019).

Em relação à execução de tapetes impermeáveis, Cruz [4] ressalta que constituem uma solução mais econômica para o controle de fluxo pela fundação da barragem, porém exigem cuidados especiais e têm se mostrado pouco eficientes, devido ao fissuramento por ressecamento e por recalques diferenciais junto ao pé de montante da barragem. Cruz [4] destaca, ainda, que o fissuramento de tapetes impermeáveis é de difícil controle, em geral devido a sua extensão, e a manutenção constante de lâmina d'água sobre eles é sempre problemática.

As observações e os relatos obtidos *in loco*, juntamente com o levantamento topográfico e as investigações geotécnicas realizadas no âmbito do Contrato nº

037/2019/ANA, possibilitaram reproduzir as seções geométricas da barragem em regiões adjacentes ao incidente (Figura 8).

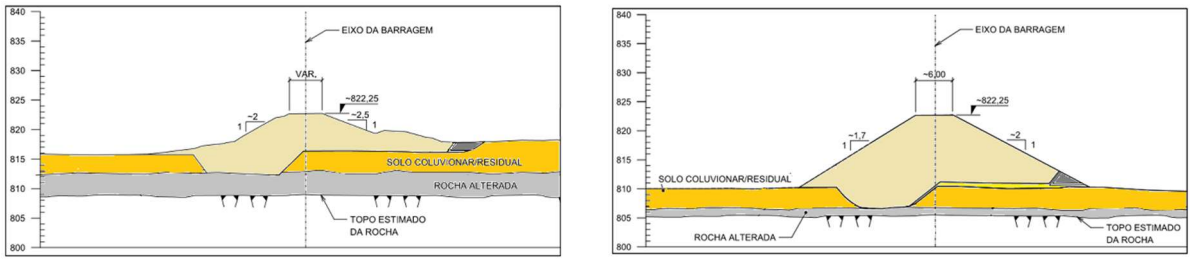


Figura 8 – Seções da barragem Granjeiro na estaca 10+7,75 e na estaca 14+12,75, respectivamente. Adaptada de relatório produzido no âmbito do contrato nº 037/2019/ANA.

Fonte: dos autores (2021).

As informações reunidas indicaram que a seção da barragem, no local do incidente, apresentava uma altura aproximada de oito metros, constituído por um solo areno-argilo-siltoso não plástico, com aproximadamente 37% de finos, com SPT variando entre 15 e 33 golpes, assente sobre um solo residual ou coluvionar, com espessura aproximada de três metros, descrito como areia fina argilo-siltosa, onde o SPT variou entre cinco e sete golpes, interceptado por uma trincheira vedante de material similar ao do aterro, seguido de um solo de coloração variegada a escura com pedregulho, de aproximadamente um metro de altura. A sondagem SPT foi interrompida atingindo o impenetrável nessa camada.

Na sequência, a sondagem atingiu um pacote de arenito de aproximadamente três metros de espessura, cor cinza-claro, estratificado, medianamente coerente (C3), com sinais de descoloração indicando alteração por lixiviação (A3). A recuperação neste trecho variou entre 36% e 70%, e Designação de Qualidade da Rocha (RQD) entre 14% e 17%, indicando maciço de qualidade péssima (R5). De 14,30 a 19,30 metros a sondagem cortou arenito pouco alterado (A2) e medianamente fraturado (F2) com recuperação entre 75% e 94% e RQD entre 64% e 25%, indicando que o maciço tinha qualidade regular (R3) a má (R4). Aos 15,50 m foi descrita uma passagem silto-argilosa, a qual está relacionada a uma interface de camadas de arenito.

Os resultados dos ensaios de infiltração nessa sondagem indicaram que, no trecho em solo, o aterro compactado da barragem não apresentava infiltração, o solo coluvionar da fundação apresentava permeabilidade da ordem de $1{,}5 \times 10^{-5}$ cm/s na profundidade de 8 metros, enquanto o ensaio de perda d'água sob pressão (tipo Lugeon) indicava, para profundidades de arenito pouco alterado, que o maciço rochoso apresentava permeabilidade de 10^{-5} cm/s. Não havia resultados de ensaio de infiltração para a camada inicial de rocha.

Cruz [4] esclarece essa questão, ao tratar da permeabilidade na interface solo/rocha, afirmando que quando os ensaios de infiltração são realizados em sondagens SPT, ao se alcançar o impenetrável, os ensaios são então interrompidos. Na retomada das sondagens por processo rotativo, há dificuldade inicial de fixar o obturador nessa superfície e os primeiros ensaios de perda d'água já são executados em profundidades inferiores.

A partir das informações apresentadas, postula-se que o maciço rochoso da fundação pode ser associado a um meio anisotrópico, que tem o seu fluxo controlado por descontinuidades preferenciais persistentes, por onde, durante os 35 anos de operação da barragem, até o incidente, formaram-se caminhos preferenciais, no sentido montante para jusante, pelas fraturas sub-verticais e descontinuidades sub-horizontais da rocha, que, ao longo do tempo, sofreram processos erosivos por fluxo concentrado nas paredes de suas aberturas, em menor ou maior proporção, a depender da qualidade da rocha. À medida que as forças hidráulicas de percolação se ampliavam, em razão do aumento das aberturas e das vazões percoladas, acelerava-se o processo de carreamento de grãos.

O fluxo em um meio confinado, como ocorre em fissuras e trincas no solo e em descontinuidades e fraturas na rocha, apresenta individualmente valores bem superiores a permeabilidade do meio em que se insere. Distingue-se aqui a permeabilidade de um meio poroso da condutividade de um meio confinado. Este último descreve a facilidade que um meio confinado oferece ao fluxo. Cruz [4] destaca que as condutividades em fissuras e fraturas rochosas são da ordem de 10^1 a $5x10^2$ cm/s, equivalentes ou superiores à porosidade de um enrocamento limpo.

3. A CAUSA

Cabe aqui apresentar os modos de desenvolvimento de ruptura por erosão interna em barragens de terra, definidos na literatura e as características da erosão observada na crista da barragem, quando da chegada da equipe da ANA à barragem, em 12/03/2019, após receber denúncia que a barragem Granjeiro estaria rompendo.

Segundo o ICOLD [5], a erosão interna é um termo abrangente e engloba quatro diferentes mecanismos de iniciação: erosão por fuga concentrada, erosão regressiva, erosão no contato entre solos e sufusão.

O início do processo de erosão por fuga concentrada, por definição, ocorre quando há a presença de aberturas no maciço da barragem ou na sua fundação por onde há fluxo de percolação, que são responsáveis em iniciar o processo erosivo de desagregação e arraste das partículas de solo localizadas na superfície da parede da abertura.

No caso do aterro, a erosão por fuga concentrada está relacionada à ocorrência de trincas transversais ocasionadas por diversas razões, citam-se aqui as principais causas: deformações ou recalques diferenciais, má compactação do solo, permeabilidade elevada do solo e superfície irregular da fundação. O processo de erosão interna por fuga concentrada no aterro é mais comum em solos plásticos e coesivos, que são capazes de manter a abertura das trincas, mas também pode ocorrer em solos siltosos bem graduados.

Na fundação, a erosão por fuga concentrada está relacionada a caminhos preferenciais de fluxo que ocorrem em fraturas ou descontinuidades da rocha, fronteiras hidrogeológicas – como o contato entre formações ou estratos com permeabilidades diferentes –, veios com permeabilidade contrastante do restante da rocha e, também, podem surgir na interface entre o maciço do aterro e a fundação. Baixas resistências da rocha agravam esse processo de erosão do maciço.

O ICOLD [5] ensina que o procedimento para avaliar a possibilidade de início de erosão por fuga concentrada em trincas no solo ou descontinuidades na rocha consiste em estimar a tensão hidráulica cisalhante atuante nas paredes da trinca, gerada pelo fluxo de percolação através dessa abertura, sob determinada condição de carga hidráulica. Essa estimativa deve considerar as dimensões da trinca e sua localização em relação ao nível do reservatório. A tensão estimada deve ser comparada à resistência do solo localizado na superfície da parede da trinca, considerando seu grau de saturação. Além disso, é importante considerar as propriedades mineralógicas do solo, como a dispersão, e as características químicas da água do reservatório.

Neste artigo, não serão abordadas aplicações de cálculos para estimar as tensões cisalhantes imposta pelo fluxo de percolação na parede das trincas, assim como o tipo de ensaio recomendado para determinar a propriedade erosiva do solo, considerando o processo de erosão de fuga concentrada ou da resistência do solo à erosão por fuga concentrada. Sobre o tema, destacam-se os estudos publicados por Fell *et al*, conforme citados pelo ICOLD [5].

O processo erosivo por erosões regressivas ou *piping* inicia com a desagregação dos grãos de solo na superfície livre a jusante e progride de jusante para montante. São principalmente associadas a erosões na fundação, contudo, em alguns casos, podem ocorrer no aterro da barragem iniciando a jusante do núcleo. Nos dois casos estão associadas à presença de solos não coesivos.

As erosões regressivas em fundações arenosas do tipo *piping* iniciam na superfície livre a jusante do pé da barragem e progridem através de múltiplos pequenos canais na fundação em direção a montante. Em fundações de solos arenosos o início da erosão regressiva é frequentemente verificado pela presença de *sand boils* na superfície livre a jusante da barragem.

O processo de formação de erosões regressivas em fundações arenosas de diques e barragens é regido pelo gradiente hidráulico crítico e foi descrito por Van Beek *et al* (2012b) citados pelo ICOLD [5] em seus experimentos realizados em modelos de grandes escalas.

O ICOLD [5] relata que a experiência americana e europeia com erosões regressivas do tipo *piping*, em barragens ou diques sobre solos aluvionares, são, em sua maioria, em fundações onde o solo erodido apresenta partículas de areia com dimensões que variam de pequena a média e coeficiente de uniformidade (Cu) menor que 3.

Terzaghi e Peck (1948), citado pelo ICOLD [5], mostram que a erosão regressiva inicia quando partículas do solo não coesivo, localizadas no pé de jusante do dique ou da barragem, onde as tensões confinantes são mais baixas, se desprendem ou a tensão efetiva se iguala a zero.

Esse fenômeno ocorre quando se tem fluxo ascendente em que a subpressão se iguala à tensão total confinante e o gradiente hidráulico crítico é expresso pela Equação 1.

$$i_c = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{y_w} \quad (1)$$

Onde i_c é o gradiente hidráulico crítico (adimensional), γ_{sat} é o peso específico saturado da areia e γ_w é o peso específico da água.

No caso do maciço da barragem, para que o processo de erosão regressiva do tipo *piping* ocorra e se desenvolva internamente, o solo do espaldar de jusante deve ser não plástico, e é necessária uma condição de superfície livre a jusante do núcleo da barragem, onde a erosão possa iniciar, como no caso de barragens com ausência de filtro ou filtro inadequado no contato entre o núcleo e a transição. Após o início do processo de erosão regressiva o núcleo ou algumas camadas do núcleo devem ser capazes de manter a estabilidade do teto sem colapsar para que o *piping* progrida. Quando o solo contíguo ou acima da cavidade inicial, estabelecida pela erosão regressiva, torna-se instável e colapsa nas primeiras formações de *piping*, ocorre o que se denomina de erosão regressiva global. Se o colapso se mantém na direção sub-vertical há a formação de subsidência.

De maneira prática, Fell *et al* (2008), citado pelo ICOLD [5], concluíram, baseados em resultados disponíveis de ensaios de instabilidade interna e com base em suas experiências e julgamentos, que solos com índice de plasticidade maior que 7 (IP > 7) não estão sujeitos a erosões regressivas para as variações previstas de gradiente hidráulico em barragens e suas fundações. Já Sun (1989), Marot *et al* (2007) e Bendahmane *et al* (2008), citados pelo ICOLD [5], confirmaram que erosões regressivas podem ocorrer em solos mais coesivos, desde que sob circunstâncias de gradientes hidráulico muito altos, incomuns de ocorrerem em barragens ou suas fundações.

Cruz [4] em seus ensaios em laboratório com amostras de solos argilosos compactadas, submetidas a percolação de água com gradientes entre 2 e 10, concluiu que procedimentos adequados de preparação e compactação das amostras não refletem o comportamento de um maciço de uma barragem sujeito ao *piping* e que esse comportamento é regido pela estatística dos extremos, isto é, a resistência a tração ou coesão do solo, que condicionará ao início da erosão por *piping* em uma barragem ocorrerá naquele local de maior fragilidade em razão de um problema de origem.

O início do processo erosivo por erosão interna de contato, por definição, ocorre quando duas camadas, uma de solo de granulometria grossa e outra de solo de granulometria fina, estão em contato direto e há a presença de fluxo de percolação pela camada de solo de granulometria grossa, que ocorre paralelo ao contato entre as camadas e a erosão se dá pela desagregação dos grãos do solo fino na região de contato com o carreamento pelos vazios do solo de granulometria grossa.

Assim, para que haja erosão de contato, dois critérios devem ser atendidos: o critério geométrico o qual os vazios do solo de granulometria grossa devem ser grandes o suficiente para a passagem dos grãos do solo de granulometria fina; e o critério hidráulico o qual a velocidade do fluxo de percolação através do solo granular seja elevada o suficiente para desagregar e transportar as partículas da camada de solo de granulometria fina pela camada de solo de granulometria mais grossa.

É mais provável que erosões de contato ocorram em locais com altas velocidades de fluxo de percolação nas camadas de solos constituídos por agregados graúdos em

que haja uma grande amplitude granulométrica entre as camadas de solos adjacentes, nos quais o critério de filtro não é atendido.

Alguns autores, citados pelo ICOLD [5], estudando erosões de contato em solos específicos, observaram que próximo à condição limite do critério de filtro, ou seja, quando o critério de filtro passa a não ser atendido, o carregamento hidráulico para iniciar a erosão está aumentando, já, no cenário oposto, distante da condição limite do critério de filtro, o carregamento hidráulico é constante.

O ICOLD [5] destaca que diferentes autores que têm estudado erosão de contato propuseram expressões para determinação da velocidade crítica na condição de domínio hidráulico, ensaiada na configuração de solo granular permeável sobre solo fino não coesivo. Para maioria desses autores a velocidade de percolação determinada pela lei de Darcy tem sido adotada como um bom indicador do carregamento hidráulico.

A conclusão dos autores é que a velocidade crítica não depende significativamente da permeabilidade do solo granular para iniciar a erosão e está relacionada somente à resistência à erosão do solo fino.

Braun's (1985), citado pelo ICOLD [5], estudando erosão de contato na configuração de solos finos não coesivos localizados sob camadas de solos granulares definiu a velocidade crítica pela Equação 2.

$$V_{crit} = 0{,}65 \cdot n_g \cdot \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g \cdot d_{50}} \cdot \quad (2)$$

Onde n_g é a porosidade do solo granular (adimensional), ρ_s e ρ_w são respectivamente a densidade das partículas do solo fino e da água (em kg/m^3), g é a aceleração da gravidade (comumente adotada 9,8 m/s^2) e d_{50} (m) é o diâmetro médio extraído da curva granulométrica do solo fino.

Guidoux *et al* (2010) citado pelo ICOLD [5] conduziram alguns testes de erosão de contato cujo solo base eram siltes e argilas e adaptaram a equação de Braun's (1985) com a inserção de um parâmetro empírico, que leva em consideração a parcela das forças de coesão entre os grãos.

$$V_{crit} = 0{,}65 n_g \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g d_H \left(1 + \frac{\beta}{d_H^2}\right)}. \quad (3)$$

O parâmetro empírico β é função das propriedades coesivas do solo base, definida como 5,3x10^{-9} m^2.

Os estudos consideram na determinação da velocidade crítica a substituição do d_{50} pelo diâmetro efetivo do solo base (d_H), em caso de solos bem graduados ou de granulometria descontínua, definido pela Equação 4.

$$d_H = \left(\sum_i^n \frac{P_i}{d_i}\right)^{-1} \quad (4)$$

Onde P_i é a percentagem em peso para o diâmetro d_i na curva granulométrica do solo.

Deve-se ressaltar que a condição hidráulica para erosão de contato depende da configuração considerada. No caso de solos finos não coesivos, localizados abaixo da camada de solo granular, a velocidade crítica de Darcy determinada em experimentos resultou em intervalos entre 0,01 m/s e 0,1 m/s. Os valores mínimos de velocidade se deram para carreamento de grãos de areia da ordem de 0,1 mm.

Um ponto importante observado nos estudos, na condição de solos finos não coesivos sobre camadas de cascalho, é que as velocidades críticas medidas foram da mesma ordem de magnitude que na configuração inversa (solos finos sob camadas de cascalho), indicando que, para as condições de ensaio, o início da erosão era dependente do transporte dos grãos e não da sua desagregação. Deve-se ressaltar, contudo, a influência da tensão confinante na velocidade crítica, a qual, para tensões totais de confinamento mais altas, tende a apresentar valores maiores para iniciar a erosão.

O ICOLD [5] destaca que os estudos de erosão de contato, os quais resultaram em equações para determinação da velocidade crítica, não podem ser aplicados para vários solos coesivos, os quais exibem diferentes comportamentos relativos às erosões, que não estão vinculados ao diâmetro dos grãos do solo, mas a outras propriedades particularmente mais relevantes, tais como a mineralogia da argila e o grau de saturação.

A erosão interna por sufusão, por definição, ocorre em solos de granulometria descontínua ou aberta, em que somente as partículas finas são transportadas internamente, no próprio solo, pelo fluxo de percolação, permanecendo as partículas graúdas e toda a tensão efetiva é transferida para a matriz pétrea de agregado graúdo remanescente. A velocidade de percolação através da matriz do solo precisa impor uma tensão suficientemente alta para superar a tensão confinante entre as partículas e para mover as partículas finas do solo através das partículas maiores. Não é interesse deste artigo abordar esse princípio em detalhes.

Uma vez que se iniciou um processo interno de erosão, esse processo irá continuar caso não se tenha, a jusante, alguma barreira física que bloqueie o carreamento de partículas de solo, tal qual a presença de filtro. O processo também pode ser interrompido no caso de redução das forças de arraste, pela redução do carregamento hidráulico.

A progressão da erosão, uma vez iniciada e não interrompida pela ação de um filtro, tende a progredir, desde que a erosão formada não provoque o colapso do solo que a cerca, fechando-a e reduzindo as forças hidráulicas a patamares inferiores aos limites de arraste. Nesse contexto, a progressão do processo depende da capacidade do solo adjacente de sustentar a cavidade formada, bem como da existência de fluxo de percolação suficiente para manter a desagregação e o transporte das partículas em direção a jusante da barragem.

Portanto, a progressão da erosão está normalmente associada à manutenção da cavidade no aterro ou na fundação durante o carreamento de material, com consequente ampliação da seção erodida.

Baseado nos estudos de Foster (1999) e Foster e Fell (1999b), citados pelo ICOLD [5], os fatores mais importantes na estabilidade da cavidade tubular é a condição de

saturação e o teor de finos, do solo, passante na peneira nº 200 (# 0,075mm). Os estudos realizados concluíram que, para teores acima de 15% de finos, é provável que o solo seja capaz de manter a estabilidade da cavidade tubular.

Fell *et al* (2008), citado pelo ICOLD [5], desenvolveram um quadro (ver Quadro 1), baseado em dados e resultados de ensaios, que indica, como regra geral, que siltes não plásticos, areias e cascalhos não conseguem manter a estabilidade de cavidades tubulares, exceto quando parcialmente saturado, ao passo que siltes coesivos e argilas podem mantê-la em qualquer condição, seja saturada ou parcialmente saturada.

Quadro 1 – Probabilidade do solo manter a estabilidade de cavidades tubulares de uma erosão por *piping*.

Sistema Unificado de Classificação do Solo	Percentual de finos	Plasticidade dos finos	Condição de saturação	Probabilidade[1]
Argilas e Argilas Arenosas (CL, CH, CL-CH)	> 50	Plástico	Saturado ou Parcialmente saturado	1,0
Solos siltosos com 50% ou mais de finos (ML ou MH)	> 50	Plástico ou não plástico	Saturado ou Parcialmente saturado	1,0
Areias argilosas e cascalhos argilosos (SC, GC)	15 – 50	Plástico	Saturado ou Parcialmente saturado	1,0
Areias siltosas, cascalhos siltosos, cascalho silto arenoso (SM, GM)	> 15	Não plástico	Parcialmente saturado Saturado	0,7 – 1,0 0,5 – 1,0
Solos granulares com algum teor de finos coesivos (SC-SP, SC-SW, GC-GP, GC-GW)	5 – 15	Plástico	Parcialmente saturado Saturado	0,5 – 1,0 0,2 – 0,5
Solos granulares com algum teor de finos não plásticos (SM-SP, SM-SW, GM-GP, GM-GW)	5 – 15	Não plástico	Parcialmente saturado Saturado	0,05 – 0,1 0,02 – 0,05
Solos granulares (SP, SW, GP, GW)	< 5	Não plástico Plástico	Independe	0,0001 0,001 – 0,01

Fonte: adaptado de Fell *et al* (2008), citado pelo ICOLD [5].

A variação da probabilidade, observada na coluna 5 do Quadro 1, indica solos bem compactados no limite superior e solos mal compactados no limite inferior.

Não havendo restrição ao carreamento de partículas de solo e mantida a cavidade no aterro ou na fundação, à medida que a seção da erosão aumenta, as forças hidráulicas

[1] Na presença de material cimentado as probabilidades indicadas são mais altas.

cisalhantes também aumentam e, desse modo, a erosão irá progredir, a menos que ocorra alguma restrição do fluxo que mantenha as forças hidráulicas iguais ou inferiores às forças resistentes do solo. O tempo de progressão da erosão está diretamente associado às propriedades do solo e às forças hidráulicas atuantes, sendo o processo bem lento no início, principalmente em solos tropicais com propriedades lateríticas, podendo ser bem rápida quando já se estabeleceu um caminho franco de percolação pelas aberturas. As propriedades de resistência do solo e as forças hidráulicas atuantes são fatores determinantes na probabilidade de sucesso de intervenções emergenciais de contenção, antes que ocorra o colapso total e a formação da brecha, principalmente se a erosão interna for constatada já em estágio de progressão.

A equipe da ANA ao chegar na barragem, em 12/03/2019, se deparou com erosão observada na crista, cuja forma circular alcançava o talude de montante (Figura 9).

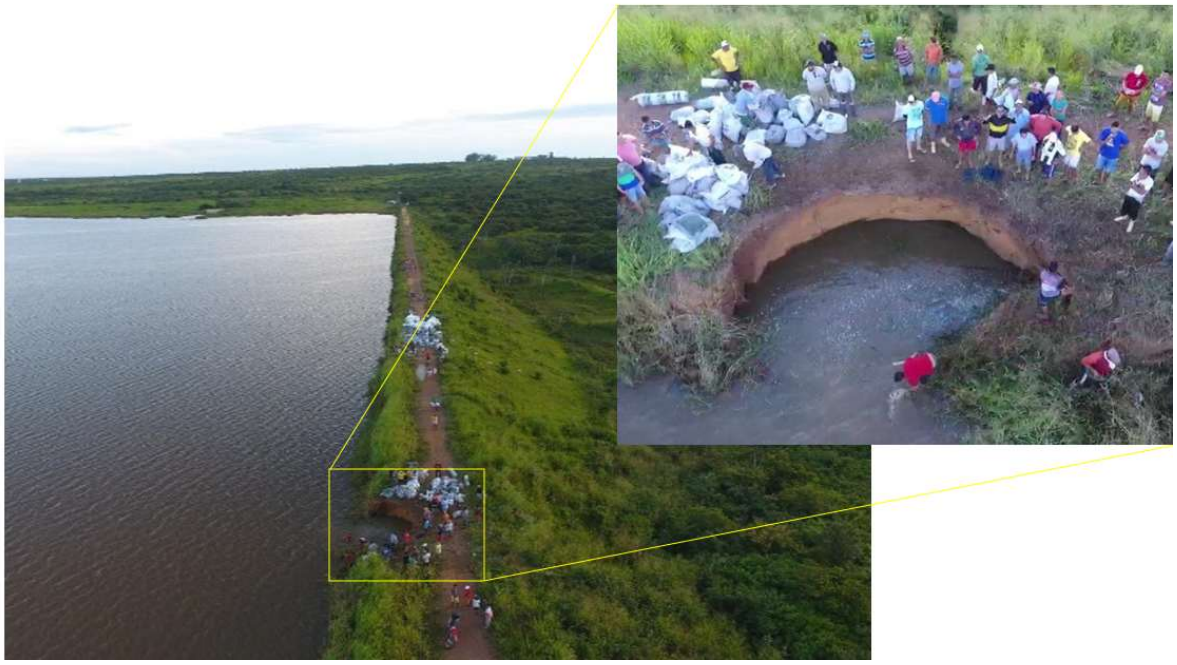


Figura 9 – Vista aérea da erosão na crista em formato circular interligada ao talude de montante.

Fonte: ANA (2019).

Nota-se, pelo formato circular da erosão, que se tratava de uma subsidência em estágio avançado, apesar disso, o solo do aterro mantinha uma condição aparentemente estável em seu entorno. Investigações de campo e ensaios de laboratório comprovaram, posteriormente, que se tratava de um maciço constituído de uma areia fina a média, argilo-siltosa, com presença de 37% de finos, com permeabilidade muito baixa, da ordem de 10^{-8} cm/s, e boas propriedades mecânicas. Ensaios de resistência à compressão triaxial do tipo adensado não drenado (CU), com carga variável em duas amostras indeformadas do aterro, coletadas a um metro de profundidade a montante e a jusante do eixo, indicaram valores de coesão iguais a 85,0 kPa, considerados bem elevados, e ângulo de atrito igual a 28º.

Portanto, os resultados demonstraram tratar-se de um solo adequado para aterros de barragem, cujo maciço se mostrava bem compactado e que permitiria, a princípio, com muita segurança, resistir às forças de percolação para as variações previstas de gradiente hidráulico, salvo em circunstâncias muito específicas.

Diante dos elementos de campo registrados pela ANA, desde a constatação da emergência até o período pós-emergência, bem como das observações realizadas durante as ações do empreendedor com o objetivo de reconstituir o maciço, e das investigações geotécnicas e ensaios de campo e de laboratório, considera-se que o processo do modo de falha iniciou pelo fluxo no sentido montante-jusante, que se formou nas fraturas e descontinuidades da rocha de fundação, presente nos primeiros metros do maciço rochoso, identificada como rocha medianamente alterada por processo de lixiviação, localizada abaixo da trincheira de vedação.

As ações cisalhantes das forças hidráulicas, imprimidas pelo fluxo de percolação, iniciaram o processo de desagregação dos grãos de areia localizados nas paredes das aberturas, em maior ou menor grau ao longo do caminho, a depender da variação das propriedades mecânicas da rocha, ampliando, ao longo do tempo, os vazios formados nas fraturas e descontinuidades da rocha. Assim, com o passar do tempo, o fluxo concentrado de percolação aumentou e, em algum momento, alcançou a camada de solo residual da fundação e a base da trincheira vedante com velocidade suficiente para iniciar o processo de desagregação do solo dessas estruturas por erosão de contato. À medida que as partículas de solo residual da fundação e da base da trincheira vedante, em contato com o fluxo concentrado, se desagregavam e eram transportados para jusante, sem restrição, novas condições de tensões se formavam na base dessas estruturas, criando um ambiente favorável a ocorrência de fraturas hidráulicas e à desagregação de novas partículas de solo por erosão regressiva, inclusive pelo próprio fluxo proveniente da freática no aterro da barragem.

Esse processo de erosão interna, que se iniciou na base da trincheira vedante e na base do solo residual da fundação, avançou ao longo do tempo e alcançou o aterro da barragem, que sob novo estado de tensões, devido ao desconfinamento da sua base, e sob ação do fluxo de percolação, sem restrições, conduziu a um processo contínuo de desagregação e carreamento de partículas de solo pelo processo de erosão regressiva. Dado as suas características não plásticas, à medida que a cavidade era formada na base, a camada logo acima não era capaz de “sustentar o teto” da cavidade e a erosão seguiu progredindo na direção sub-vertical, até a formação da subsidência observada na crista, cuja abertura foi se ampliando, atingiu o talude de montante e alcançou o reservatório. Relato do mergulhador, que trabalhou durante a emergência posicionando sacos de areia, indicou que havia uma força exercida pela água que tendia a puxá-lo para baixo, confirmando que havia formado um fluxo da crista para à fundação.

4. AÇÕES REALIZADAS DURANTE A EMERGÊNCIA

Diante da situação emergencial e sem conhecer o modo de falha que teria ocasionado aquela anomalia, uma das primeiras ações da ANA foi solicitar apoio técnico ao estado do Ceará, para, em conjunto, decidir as melhores ações a serem tomadas, uma vez

que o empreendedor se mostrou incapaz de adotar alguma ação para evitar que este incidente se tornasse um acidente, mesmo porque desconhecia a gravidade do problema.

A decisão tomada em conjunto foi pela utilização de sacos de areia para criar uma barreira entre a erosão e o reservatório, a fim de conter o avanço do processo erosivo observado na crista da barragem. Ressalta-se que essa ação só foi possível devido ao apoio da Defesa Civil Estadual, que disponibilizou um profissional e mergulhador experiente, que, assumindo risco, entrou no reservatório amarrado a uma corda de segurança e foi posicionando os sacos de areia à medida que eram preparados com o apoio da comunidade local (Figura 10).



Figura 10 – Sacos de areia posicionados na região da erosão.

Fonte: ANA (2019).

Em paralelo, uma segunda decisão foi tomada: a necessidade de rebaixamento do nível do reservatório. Em razão da ausência de uma descarga de fundo e o fato do vertedouro original consistir em um canal escavado com a base em topo rochoso, o rebaixamento demandou a construção de um vertedouro auxiliar de emergência, em cota inferior à do vertedouro original.

Nesse contexto, com o apoio da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH-CE) e da Superintendência de Obras Hidráulicas do Estado do Ceará (SOHIDRA), que forneceu o maquinário e os operadores, foi construído um vertedouro na ombreira direita, entre o vertedouro original e a barragem. A escolha desse local deveu-se às condições geotécnicas mais favoráveis, caracterizadas por solo muito compacto, laterizado, de coloração vermelho-escura, que se mostrava mais competente do que o da ombreira esquerda.

Posteriormente, uma sondagem rotativa no local, indicou um material com recuperação da ordem de 67%, sempre fragmentado (F5) e muito alterada (A4), a solo de alteração (A5), coerente (C2 – no material recuperado). O solo é observado na parede direita do talude de escavação do vertedouro auxiliar de emergência (Figura 11).



Figura 11 – Solo laterizado da ombreira direita onde foi escavado o vertedouro auxiliar durante as ações emergenciais.

Fonte: ANA [2].

Concluída a escavação do vertedouro auxiliar de emergência, o nível de água do reservatório foi rebaixado em quatro metros e de forma unânime se entendeu que poderia ser encerrada a emergência.

A barragem foi embargada pela ANA, que estabeleceu como medida corretiva o descomissionamento da estrutura. O empreendedor, entretanto, conseguiu judicialmente manter a barragem em operação, mas entre as medidas estabelecidas pelo juízo, por determinação da ANA, o empreendedor deveria operar a barragem em cota restrita, definida pela cota da soleira do vertedouro auxiliar e executar um sistema de drenagem a jusante, para coleta e condução de eventuais surgências até medidor de vazão, bem como monitorar o nível do reservatório e das vazões percoladas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No caso da Barragem Granjeiro o fluxo de percolação é controlado por descontinuidades preferenciais na fundação, daí a importância, na fase de projeto, da realização de investigações geotécnicas e avaliações complementares, para conhecer o problema e definir solução que melhore as condições da fundação, que seja tecnicamente adequada e economicamente viável e que atenda o princípio de controle da entrada de água por montante e drene de forma eficaz e disciplinadamente, por jusante, a água que percolar.

A solução de trincheira (cut off) parcial não foi tecnicamente suficiente, o que ressalta a importância fundamental da execução de um sistema de drenagem do conjunto aterro/fundação à jusante. O dreno horizontal e o dreno de pé projetado para a seção principal, no contato aterro/fundação, não foi observado na seção da barragem onde ocorreu o incidente.

Apesar das deficiências da fundação e da ausência de sistema de drenagem, para o conjunto aterro/fundação, que fosse adequado para o fluxo de percolação observado, a barragem Granjeiro tinha um aterro constituído de solo areno-argilo-siltoso muito bem compactado, que apresentou ótimo desempenho ao longo de 35 anos, mesmo sob excessivas forças hidráulicas atuantes.

Por fim e não menos importante, para operação da barragem Granjeiro, é necessária a realização de inspeções visuais periódicas e de medidas das vazões percoladas, e eventuais carreamentos de sedimentos e deformações superficiais devem ser avaliados durante as inspeções.

6. PALAVRAS-CHAVE

Erosão interna; Barragem de Terra; Fundação em Arenito; Fluxo de Percolação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANA - Agência Nacional de Águas. “Barragem Granjeiro – Análises de Estabilidade.” - NOVA ENGEVIX – Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A.. Realizada em 26/05/2020. Documento 02500.031535/2020 Florianópolis, 2020.

[2] ANA – Agência Nacional de Águas. (2020) – “Barragem Granjeiro - Relatório de Reconhecimento – Inspeção de Campo” - NOVA ENGEVIX – Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A.. Realizada em 17/12/2019. Documento: 02500.003293/2020. Florianópolis.

[3]. ANA - Agência Nacional de Águas. (2020) – “Barragem Granjeiro – Primeiro Relatório de Evolução das Anomalias – Inspeção de Campo” - NOVA ENGEVIX – Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A. Realizada em 06/02/2020. Documento: 02500.018771/2020. Florianópolis.

[4] CRUZ, P. T. (1996) – “100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto”. São Paulo: Oficina de Textos. 648 p.

[5] ICOLD – International Commission on Large Dams. (2025) – “Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations”. Bulletin 164. Disponível em https://www.icold-cigb.org/GB/publications/bulletins.asp. Acesso em: 06 mai. 2026.

[6] CARNEIRO, H. F. (2021) – “Erosões Internas no Aterro da Barragem Granjeiro: Estudo de Caso”. 115 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais) – Universidade Federal da Bahia.

[7] ANA - Agência Nacional de Águas. (2020) – “Barragem Granjeiro – Levantamento Geológico-Geotécnico” - NOVA ENGEVIX – Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A.. Documento: 02500.021842/2020. Florianópolis.

[8] ANA - Agência Nacional de Águas. (2020) – “Barragem Granjeiro – Relatório de Ensaios Geotécnicos” - NOVA ENGEVIX – Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A.. Documento: 02500.027204/2020. Florianópolis.

	**Helton França CARNEIRO** Graduado em Engenharia Civil pela EESC-USP (1998), com especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais (2022) pela UFBA. Desde 2008 atua como Analista de Infraestrutura, carreira transversal atualmente sob a gestão do MGI, sendo os últimos sete anos dedicados à área de Segurança de Barragens, atuando diretamente na fiscalização de segurança de barragens na Coordenação de Fiscalização de Segurança de Barragens da ANA.
	**Josimar Alves de OLIVEIRA** Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará, com mestrado em Recursos Hídricos pela Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e especialização em Segurança de Barragens pela Universidade Federal da Bahia. Desde 2008 atua como Especialista em Infraestrutura Sênior do Ministério da Gestão e Inovação e atualmente é Coordenador de Fiscalização Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.
	**Altair Maciel de BARROS** Engenheiro civil e mestre em Recursos Hídricos e Saneamento pela Universidade Federal de Alagoas. Possui experiência nas áreas de recursos hídricos e hidrologia urbana. Atualmente, exerce o cargo de Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico na ANA onde atua na Coordenação de Fiscalização de Segurança de Barragens.
	**Jonas PERTUSATTI** Bacharel e mestre em Química pela Universidade de Brasília – UnB, doutor em Educação em Ciências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Exerce o cargo de Especialista em Regulação de Recursos Hídricos e Saneamento Básico na ANA, onde atua há dois anos na Fiscalização de Segurança de Barragens. Suas principais áreas de interesse incluem a gestão integrada dos recursos hídricos, a segurança de barragens e a avaliação de impacto de políticas públicas.
	**Rodolpho Rodrigues SOARES** Engenheiro Civil pela UNINASSAU (2022) e mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (2025). Desde 2023, atua na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, na área de Segurança de Barragens, desenvolvendo atividades relacionadas à fiscalização de segurança de barragens na Coordenação de Fiscalização de Segurança de Barragens.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS
TEMA SR.2
BELÉM – PA, 23 DE SETEMBRO DE 2026

FUNDAÇÃO ROCHOSA DA BARRAGEM DO MIRIM: ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS – MINA DO SALOBO, SUDESTE DO ESTADO DO PARÁ

Daniele GONÇALVES
GEÓLOGA GEOTÉCNICA - BVP Geotecnia e Hidrotecnia

Ayla KEPPEL
GEÓLOGA GEOTÉCNICA - BVP Geotecnia e Hidrotecnia

Luciene ALMEIDA
GEÓLOGA GEOTÉCNICA - BVP Geotecnia e Hidrotecnia

Carlos LIMA
GEÓLOGO GEOTÉCNICO - Vale Base Metals

Hugo CAMPELO
ENGENHEIRO DE MINAS - Vale Base Metals

RESUMO

A caracterização geológico-geotécnica de fundações rochosas é uma etapa essencial em projetos como barragens e diques, pois avalia propriedades como resistência, composição e estruturas das rochas que servirão de base para a construção. A Barragem de Rejeitos do Mirim, localizada na Mina do Salobo em Marabá (PA), foi implantada para contenção de rejeitos da usina de concentração de cobre e depósito para captação de água bruta utilizada na operação. A barragem está inserida em quartzitos do Supergrupo Itacaiúnas, pertencentes ao Grupo Igarapé Salobo. A fundação é composta por quartzitos, intrusões máficas intemperizadas (saprólito de milonito) e zonas pegmatíticas (saprólito de pegmatito. A caracterização foi realizada na escala 1:500, ao longo dos 86 m de desnível entre a base e a crista, seguindo parâmetros geomecânicos do ISRM (2007). O quartzito mostra coloração variável (esbranquiçada, acinzentada, amarelada e localmente avermelhada), resistência de média a alta (R3/R4) e fraturamento moderado (F3/F4). As intrusões máficas intemperizadas ocorrem encaixadas no fraturamento principal subvertical, por toda a fundação, com resistência muito branda (R1+) e alto grau de alteração (A5). Nos contatos entre quartzitos e intrusões, ocorrem bordas alteradas com resistências entre R1- e R0 e graus de alteração A5 a A6. Foram identificadas três famílias de fraturas, com paredes fechadas e sem preenchimento com delgadas lentes pelíticas alteradas e de baixa resistência (A5, R1− a R1+), paralelas à foliação E-W. De um modo geral, a fundação mantém suas características geotécnicas consistentes desde a base até a crista, com poucas variações, associadas ao intemperismo mais intenso próximo ao topo.

ABSTRACT

The geological-geotechnical characterization of rock foundations is an essential step in projects such as dams and dikes, as it evaluates properties such as resistance, composition, and structures of the rocks that will serve as the base for construction. The Mirim Tailings Dam, located at the Salobo Mine in Marabá (PA), was implemented to contain tailings from the copper concentration plant and to store raw water used in the operation. The dam is located in quartzites of the Itacaiúnas Supergroup, belonging to the Igarapé Salobo Group. The foundation is composed by quartzites, weathered mafic intrusions (mylonite saprolite), and pegmatitic zones (pegmatite saprolite). Characterization was performed at a 1:500 scale along the 86 m elevation difference between the base and the crest, following geomechanical parameters from ISRM (2007). The quartzite shows variable coloration (whitish, grayish, yellowish, and locally reddish), medium to high resistance (R3/R4), and moderate fracturing (F3/F4). The weathered mafic intrusions occur embedded in the main subvertical fracture throughout the foundation, with very mild resistance (R1+) and a high degree of alteration (A5). At the contacts between quartzites and intrusions, altered edges occur with resistances between R1 and R0 and degrees of alteration A5 to A6. Three fracture families were identified, with closed walls and no infilling, with thin lenses. Altered pelitic rocks of low resistance (A5, R1− to R1+), parallel to the E-W foliation. In general, the foundation maintains its consistent geotechnical characteristics from the base to the crest, with few variations, associated with more intense weathering near the top.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização geológico-geotécnica constitui uma etapa fundamental para o planejamento, implantação e acompanhamento de grandes obras como barragens e diques. Este tipo de estudo permite avaliar as condições do maciço rochoso, a identificação das descontinuidades estruturais, levando a compreensão do comportamento dos materiais frente às solicitações impostas pela obra. O presente estudo mostra parte do mapeamento geológico-geotécnico realizado durante a etapa 265 de alteamento da Barragem do Mirim, situada na Mina do Salobo, município de Marabá, no estado do Pará.

A Barragem do Mirim foi projetada com a finalidade de armazenamento dos rejeitos provenientes da usina de beneficiamento de cobre da Mina do Salobo, além disso, desempenha uma importante função no armazenamento e captação de água bruta para os processos industriais. Corresponde a uma estrutura de enrocamento com núcleo argiloso. Esta estrutura está sendo alteada a jusante em três etapas (etapas 265, 275 e 285), sendo que em cada etapa, toda a base da fundação e ombreiras estão sendo reforçadas até a elevação de crista em 10 m. Ao final de todas as etapas teremos um alteamento total de 30 m e altura final da estrutura em 105 metros. Dessa forma, o conhecimento das condições geológicas e geotécnicas em detalhe da base da fundação e das ombreiras é essencial para garantir a estabilidade e segurança da estrutura ao longo de sua vida útil.

Este estudo foi realizado com base em dados obtidos ao longo da execução da obra da etapa 265 de alteamento, no período compreendido entre junho de 2021 a fevereiro de 2024, integrando informações de campo, registros anteriores e avaliações geomecânicas baseadas em critérios consagrados, como os definidos pela ISRM. O mapeamento foi realizado em escala detalhada (1:500), abrangendo desde a base da fundação até as cotas mais elevadas da barragem.

1.1 Aspectos Geológicos Regionais

A área da Barragem do Mirim situa-se no contexto da Província Mineral de Carajás – A área estudada situa-se no contexto da Província Mineral de Carajás – PA, na região do Projeto Salobo, sendo que este, constitui o complexo minerador da maior jazida de Cu-Au (Ag) do território nacional. O depósito mineralizado apresenta uma extensão na direção SE-NW de aproximadamente 4 km, com uma profundidade investigada de 750 metros a partir da topografia original e uma largura que varia de 600 metros na porção central a 100 metros nas extremidades.

Verifica-se na Figura 1 que, geologicamente, o projeto Salobo encontra-se na porção SE do Cráton Amazônico, no Estado do Pará, que em síntese é constituída por migmatitos, gnaisses e granodioritos, sequências vulcano-sedimentares, além de coberturas sedimentares clasto-químicas, unidades estas que foram reunidas ao longo da evolução do conhecimento geológico da região em Supergrupos, Grupos e Formações. Estruturalmente a área do projeto está encaixada na borda sul do chamado Duplex Transpressivo do Salobo [1] ou Sidewall Ripout do Salobo [6].

Geologicamente, a barragem está encaixada nos quartzitos do Supergrupo Itacaiúnas, pertencente, regionalmente, ao Grupo designado como Igarapés Salobo [2][3][7].

O Grupo Igarapé Salobo é formado pelo Gnaisse Cascata e Formação Três Alfa (anfibolitos, quartzitos, metagrauvacas e formações ferríferas) na base e no topo é formado pela Formação Cinzento com gnaisses e quartzitos [3]. Este grupo é hospedeiro do depósito de óxido de ferro Cu-Au do Salobo [3][5], apresenta idades estimadas entre 1,9 e 2,8 Ga e encontra-se encaixado em gnaisses do Complexo Xingu [8], conforme pode ser observado na Figura 1.

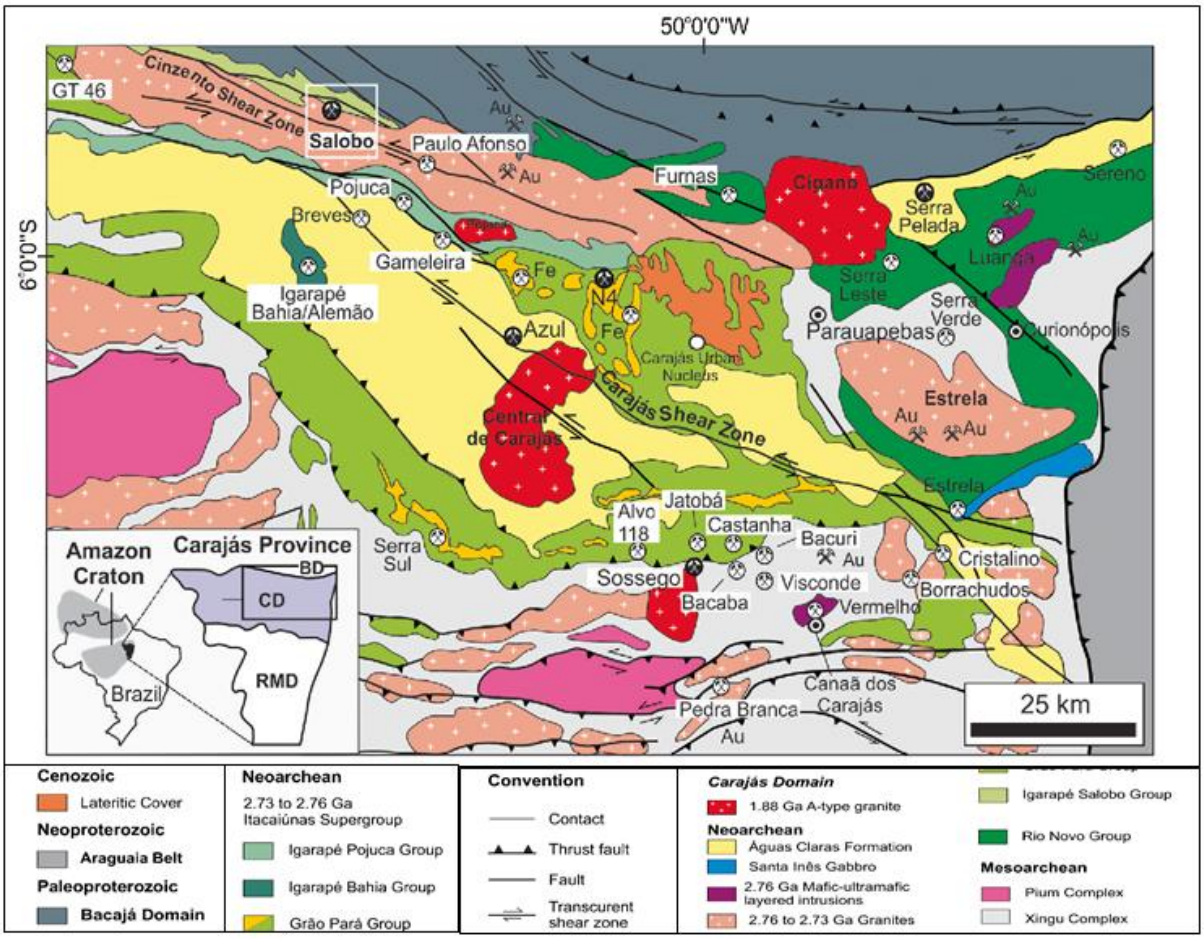


Figura 3 – Mapa geológico da província mineral de Carajás com os principais depósitos minerais. Modificado de [8].

1.2 Caracterização Geológico-geotécnica das Fundações da Barragem do Mirim

A caracterização geológico-geotécnica das fundações foi realizada com base em mapeamento e reconhecimento dos litotipos em campo. Foram avaliadas as características de cada litotipo em particular em comparação com os parâmetros geomecânicos já utilizados e validados pela BVP, conforme Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 1 - Classificação do grau de resistência do maciço (modificada pela BVP Engenharia, 2012).

ISRM (ADAPTADO)										
Índice de Resistência [2]		Descrição	Rc (MPa)	I.S. (MPa)	Avaliação de Campo					
					Martelo	Risco Canivete [1]	Queda Canivete	Raspagem Canivete [1]	Risco Unha	Pressão Manual
R6		Extremamente resistente	>250	>10	Lascada	-	-	-	-	-
R5		Muito resistente	100 - 250	4 - 10	Quebra com dificuldade com vários golpes	-	-	-	-	-
R4		Resistente	50 - 100	2 - 4	Quebra com vários golpes	Risco superficial	-	-	-	-
R3		Medianamente resistente	25 - 50	1 - 2	Quebra com dificudade com um golpe		Ponto pequeno	Com muita dificuldade	-	-
R2	R2 +	Pouco resistente	10 - 25	-	Quebra com um golpe	Risca		Com dificuldade	-	-
	R2 -	Branda	5 - 10		Fragmenta com um golpe		Ponto grande	Produz pó	Risco superficial	-
R1	R1 +	Muito branda superior	3 - 5	-		Risca fundo		Com facilidade produz muito pó	Risca	Quebra pontualmente
	R1 -	Muito branda inferior	1 - 3		Desagrega	Corta (separa)	Penetra	Descasca entralha	Penetra	Quebra as bordas
R0		Extremamente branda	0.25 - 1	0	-	-	Penetra	-	Corta	Desagrega

Notas:
[1] O martelo de geólogo deve prevalecer sobre o uso do risco com canivete em amostras R3 e R4 que sejam muito ricas em minerais lamelares;
[2] Referências típicas R0 / R1+ (saprolitos); R1+ (tijolo); R2- (solo-cimento); R2+ (concreto comum); R3 (concreto especial);
[3] Siglas: /.S: Indice Puntiforme, RC: Resistência a compressão Uniaxial.

ÍNDICE DE REAÇÃO AO MÉTODO
Alta
Média
Baixa

Tabela 2 - Tabela de classificação do grau de alteração de rochas (adaptado pela BVP Engenharia).

Grau	Alteração	Descrição
A6	Solo	Residual (Maduro ou Jovem) Transportado (Aluvião ou Colúvio)
A5	Extremamente Alterada	Apresentam minerais primários físico e quimicamente alterados e totalmente pulverulentos. A textura original é preservada.
A4	Muito Alterada	Apresenta minerais primários muito alterados físico e quimicamente, por vezes pulverulentos e friáveis.
A3	Medianamente Alterada	Apresenta minerais primários muito alterados físico e quimicamente. Rocha bastante descolorida.
A2	Levemente Alterada	Minerais primários apresentam alterações físicas e químicas incipientes. Rocha ligeiramente descolorida.
A1	Rocha Sã	Apresenta minerais primários sem vestígios de alteração.

Tabela 3 - Tabela de classificação da compacidade dos solos argilosos/siltosos, segundo ISRM.

Classe	Consistência	Rc (Mpa)	Resposta Mecânica	SPT
S6 (Saprolito)	Dura	>0,5	Indentada pelo polegar com dificuldade	>30
S5	Muito Rija	0,25 a 0,5	Facilmente indentada pelo polegar	20 a 30
S4	Rija	0,1 a 0,25	Facilmente indentada pelo polegar, mas penetrada só com grande esforço	11 a 19
S3	Média	0,05 a 0,1	Penetrável com dificuldade vários centímetros pelo polegar	6 a 10
S2	Mole	0,025 a 0,05	Facilmente penetrável vários centímetros pelo polegar	3 a 5
S1	Muito Mole	< 0,025	Facilmente penetrável vários centímetros pelo punho	<2

Tabela 4 - Classificação do grau de fraturamento (ISRM,1981).

Categoria	Espaçamento médio das Fraturas (cm)	N° de Fraturas por metro	Descrição
1	> 200	<0,5	Maciço
2	200-60	0,5-2	Pouco Fraturado
3	60-20	2-5	Medianamente Fraturado
4	20-6	5-17	Muito Fraturado
5	<6	<17	Extremamente Fraturado

2. MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DO MIRIM

2.1 Métodos Utilizados

O mapeamento geológico-geotécnico local dos litotipos da fundação da Barragem do Mirim (Figura 2) consistiu essencialmente na avaliação em campo dos materiais que constituem a fundação, precedidos por um apanhado sobre os dados pré-existentes coletados. Além das avaliações de campo, foram realizadas análises mineralógicas e petrográficas dos quartzitos.

A escala de realização do mapeamento utilizada em geral foi a de 1:500. Toda a avaliação foi realizada de forma sistemática e contínua seguindo o acompanhamento e a evolução da obra de atleamento. Os dados apresentados a seguir constituem a consolidação das avaliações de fundação executadas a partir da elevação 179,00 na base da fundação até a elevação 266,20 (Datum Sirgass 2000).



Figura 2 – Visão de jusante para montante da fundação da Barragem do Mirim no início da etapa 265.

Inicialmente, após a conclusão da escavação, realizava-se a execução da limpeza manual (Figura 3) e/ou com compressor (Figura 4) da área e validação da escavação do projeto pelo responsável pelo levantamento topográfico. Caso houvesse zonas na fundação com excesso de umidade, estas áreas eram esgotadas e limpas antes da avaliação geológico-geotécnica. A partir daí, o responsável técnico, dirigia-se até os pontos que deveriam ser observados e realizava a avaliação geológico-geotécnica conforme os parâmetros definidos pela BVP e já apresentados anteriormente.



Figura 3 – Limpeza manual da ombreira direita na região dos filtros de transição.



Figura 4– Limpeza com o compressor de ar na ombreira esquerda na região do núcleo argiloso.

2.2 Mapeamento Geológico-geotécnico

Os trabalhos de avaliação e mapeamento geológico geotécnico iniciaram-se no dia 25/08/2021 e finalizaram no dia 06/02/2024. A partir da elevação 179,00, a fundação é constituída, na base e nas ombreiras, predominantemente por quartzitos, intrusões máficas milonitizadas e intemperizadas (saprólito de milonito) e porções com textura pegmatítica (saprólito de pegmatito ?) (Figuras 5, 6 e 7), localizadas comumente no contato quartzito/intrusão.

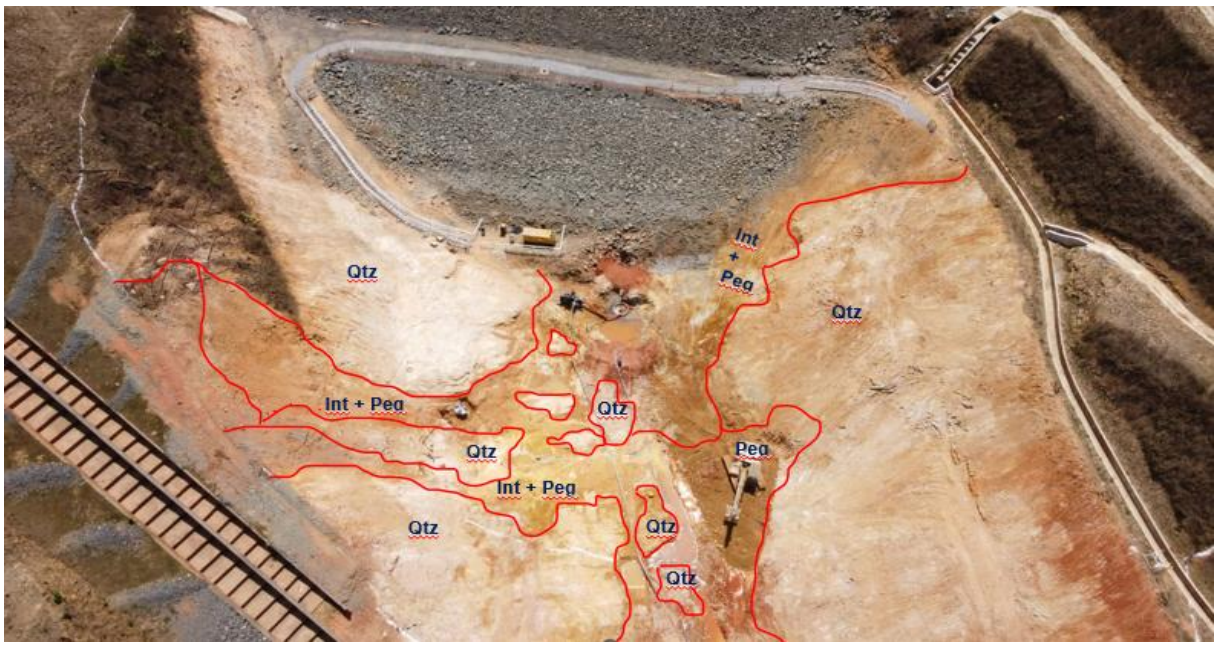


Figura 5 – Visão geral em planta da área da fundação com os principais litotipos identificados. A partir da elevação 179,00.



Figura 6 – Visão geral da fundação na ombreira direita.



Figura 7 – Visão geral da fundação na ombreira esquerda.

2.3 Litotipos Identificados

2.3.1 Quartzitos

Em geral o quartzito mostra-se com coloração principalmente esbranquiçada, com variações desde o acinzentado, amarelado e, localmente avermelhado. Apresenta grau de resistência variando de médio a alto (R3/R4) e grau de fraturamento de

moderado abaixo (F3/F4). Constituído predominantemente por quartzo recristalizado mostrando textura granoblástica, de aspecto opaco a translúcido. É possível também notar a presença de muscovista sob a forma de palhetas estiradas. Conforme seus graus de resistência, fraturamento e intemperismo, os quartzitos foram discriminados em três tipos: 1- Quartzito fraturado (R4/F4/A2) (Figura 8); 2- Quartzito fraturado intemperizado (R3/F4/A3) (Figura 9) e 3 - Quartzito bastante fraturado e intemperizado (R2/F5/A4) (Figura 10).



Figura 8 – Quartzito (R4/F4/A2) que ocorre na parte basal da ombreira esquerda. Notar a resistência e o aspecto fraturado.



Figura 9 – Detalhe do contato entre as variações de quartzito (R3/F4/A3) a esquerda e (R4/F4/A2) a direita que ocorrem na ombreira direita. Elevação 236,00.



Figura 10 – -Detalhe do quartzito (R2/F5/A4). Elevação 263,00.

Localmente foram identificados nos quartzitos pequenos falhamentos de escala métrica (Figura 11) e microvenulações de quartzo (Figura 12).



Figura 11 – Falhamento identificado em planta no patamar da ombreira direita na elevação 239,50. Não foi possível identificar o sentido do deslocamento.



Figura 12 – Microvenulações de quartzo identificadas no Quartzito R3 na ombreira direita. Elevação 241,00.

Com relação a estruturação os planos preferenciais de fraturamento do quartzito mostram mergulhos que variam de 20° a 85° com tendências principalmente para SW (Figura 13). As fraturas são normalmente fechadas, mostrando pequenas aberturas superficiais não atingindo 5 mm e comumente restritas ás zonas próximas ao contato com as intrusões máficas intemperizadas.

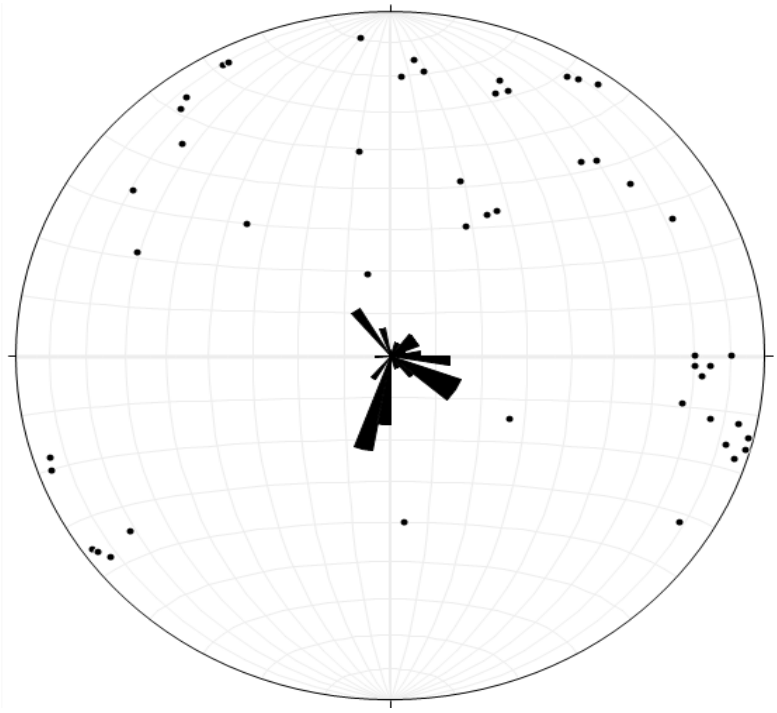


Figura 13 – Planos de fraturamento do quartzito.

Mineralogicamente, os quartzitos são constituídos por quartzo, muscovita, feldspato, caulinita e sericita, estas últimas ocorrendo como produtos de alteração intempérica do feldspato e muscovita (Figura 14).

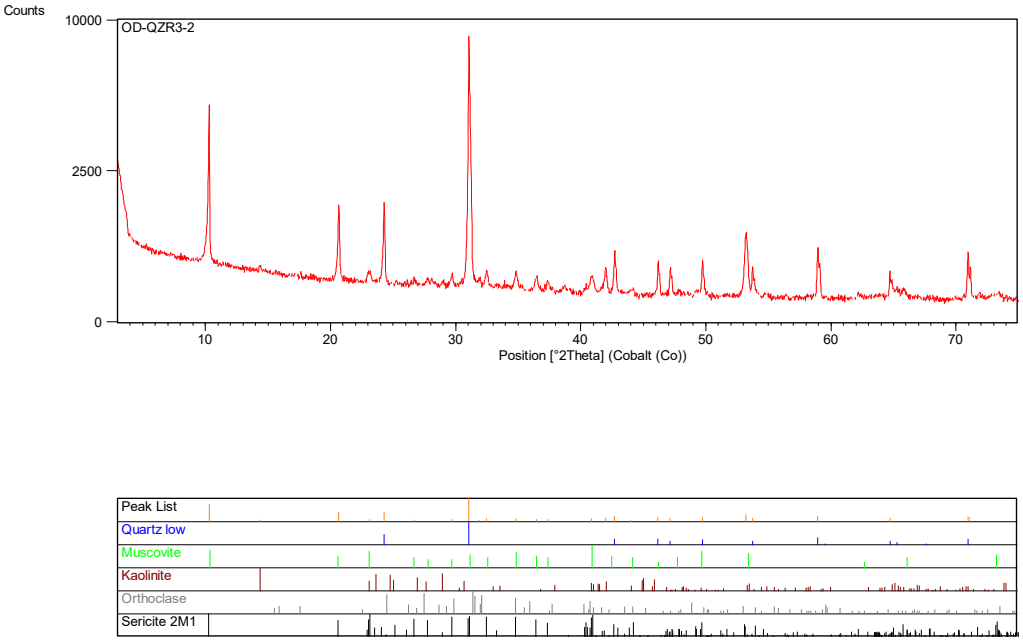


Figura 14 – Composição mineralógica dos quartzitos.

A análise petrográfica mostrou que os quartzitos, principalmente R3, mostraram uma textura granular, anisotrópica, holocristalina, inequigranular grossa, com grande parte dos cristais variando de 0,5-14 mm. Os cristais de quartzo compõem quase que 100% da rocha e mostram-se subédricos a anédricos com contatos retos entre si e contatos irregulares entre os demais. Eles apresentam-se alongados com dimensões de até 14mm com inclusãode muscovita nas zonas de microfraturas dos cristais de quartzo. Os cristais de feldspato são subédricos, com tamanho variando de 0,5-13mm com contatos irregulares com os cristais de quartzo é possível notar que os cristais possuem centro alterando para sericita. Os cristais de muscovita formam aglomerados com bordas de sericita e variam de subédricos a anédricos com dimensões de até 1

Mm (Figura 15).

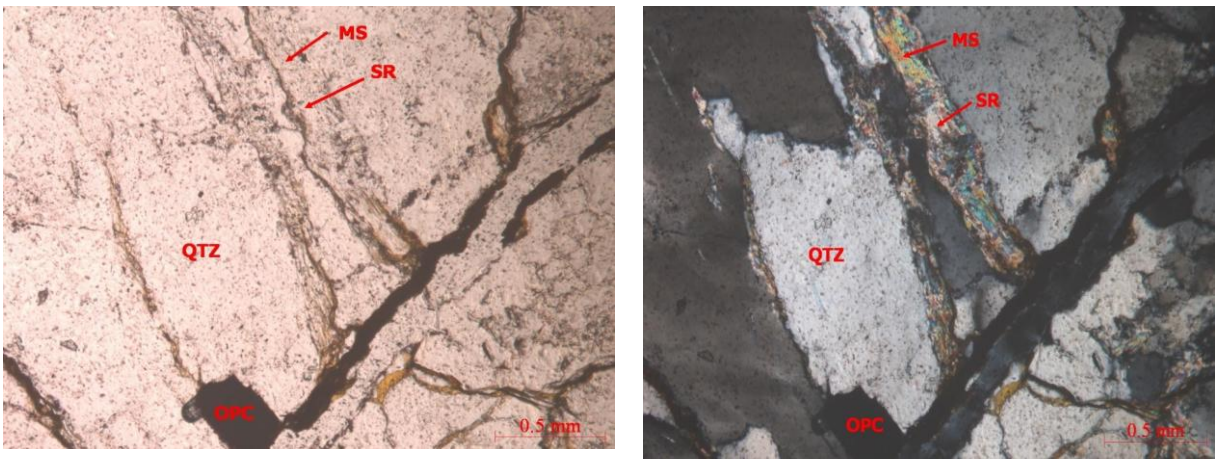


Figura 15 – Textura microscópica do quartzito R3.

2.3.2 Intrusões Máficas Milonitizadas e Intemperizadas

As intrusões máficas milonitizadas ocorrem encaixadas normalmente no fraturamento principal subvertical e perpassam de ombreira a ombreira passando pela base da fundação (Figuras 16 e 17). Estas feições podem atingir entre 8 e 12 m de largura. Consistem em um saprólito de resistência extremamente branda (R1+) com grau de alteração A5. Localmente foram observados veios de quartzo centimétricos que no interior das intrusões.



Figura 16 – Visão geral da ombreira direita. Notar as variações de intrusões máficas intemperizadas e quartizitos. Elevação 203,20.



Figura 17 – Visão geral da ombreira esquerda. Elevação 229,00.

Localmente foram observadas intrusões subhorizontalizadas (Figura 18), bem como associadas pontualmente a foliação do quartzito. Uma intrusão máfica que ocorre na região do núcleo argiloso, em elevações mais superiores, mostra um grau de resistência em torno de R2+, um pouco mais elevado que a maioria das instrusões identificadas. Mostra-se bastante endurecida e, localmente formando crostas ferruginosas. Em particular, essa intrusão permeia os planos de foliação do quartzito (Figura 19), diferentemente das anteriores que estão posicionadas entre os planos de fraturamento dos quartzitos.

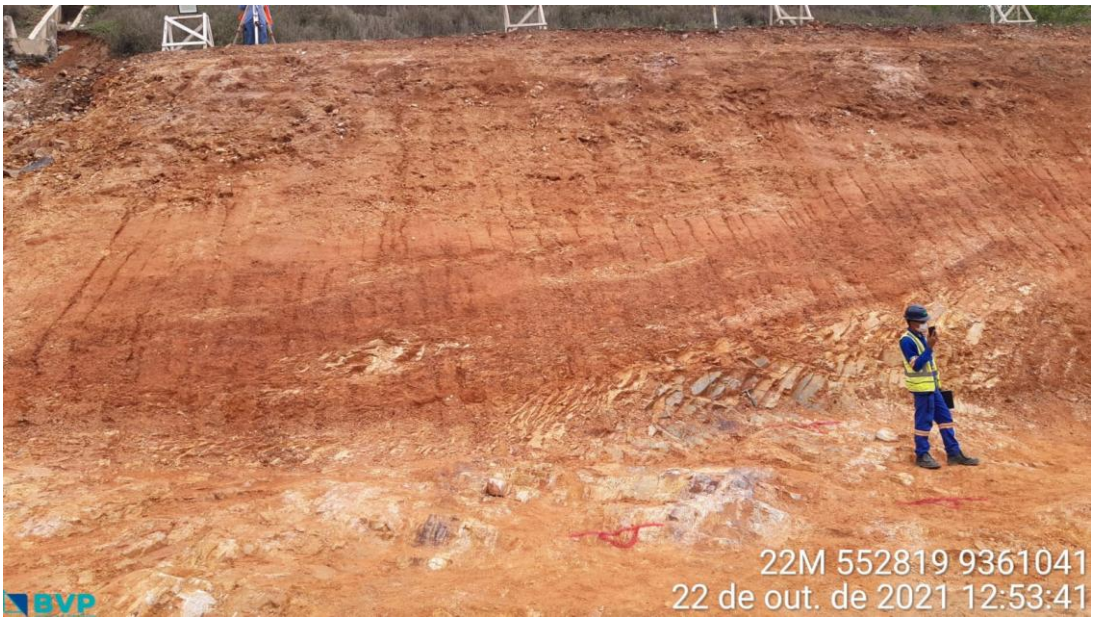


Figura 18 – Visão geral da ombreira esquerda. Notar intrusão máfica subhorizontalizada. Elevação 195,00.



Figura 19 – Detalhe da intrusão máfica intemperizada permeando entre a foliação do quartzito. Elevação 260,80.

Tanto na ombreira direita, quanto na esquerda, foram observadas zonas onde há a ocorrência de filetes centimétricos de intrusão intemperizada (Figura 20) que permeiam principalmente o fraturamento subvertical dos quartzitos compondo zonas métricas onde os quartzitos mostram-se intensamente friáveis e quebradiços com resistência próxima ao R2.



Figura 20 – Detalhe das zonas de filetes de intrusão máfica intemperizada que permeia o fraturamento subvertical do quartzito. Elevação 240,00.

2.3.3 Feições Pegmatíticas

No contato entre os quartzitos e as intrusões comumente, foram identificadas bordas de alteração, onde ocorre a recristalização de quartzitos, formando feições similares a pegmatitos, porém menos resistentes (Figura 21). Estas feições apresentam resistências que variam de R1- a R0 e grau de alteração/intemperismo variando de A5 a A6, bastante alterados e intemperizados, muito friáveis, esbranquiçadas e compostas em geral por quartzo em tamanhos centimétricos envolvidos por uma massa argilosa esbranquiçada, mas que localmente pode se apresentar com tons avermelhados/amarronzados.



Figura 21 – Detalhe do contato do quartzito com a intrusão máfica intemperizada mostrando as porções pegmatíticas. Elevação 253,00.

As zonas de contato entre o quartzito e as intrusões intemperizadas e milonitizadas compreendem zonas de menor resistência. Na figura 22, é possível verificar o aspecto já bastante alterado desses veios que ocorrem como um material bastante friável, composto por fragmentos centimétricos de quartzo envolvidos por uma matriz argilosa esbranquiçada caulínica.



Figura 22 – Contato entre o quartzito e a intemperizados e milonitizados.

Todas as informações do trabalho de mapeamento geológico-geotécnico foram consolidadas no Mapa geológico-geotécnico da barragem do mirim, etapa 265 (Figura 23).

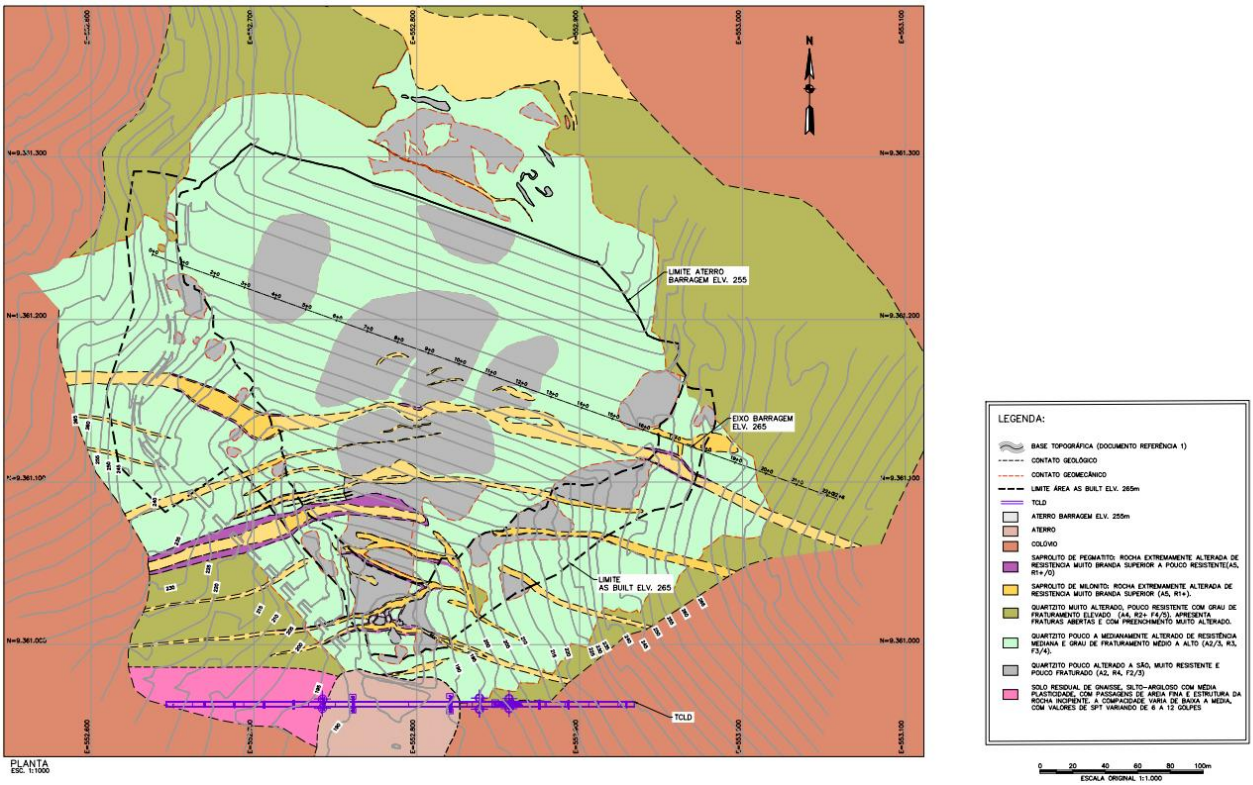


Figura 23 – Mapa geológico-geotécnico da Barragem do Mirim. Etapa 265. Datum: Sirgas 2000.

3. CONCLUSÕES

O trabalho realizado atestou que com o avanço da obra de alteamento sobre a base da fundação e ombreiras na barragem, o maciço rochoso manteve ao longo de toda a variação de cotas as mesmas características litológicas (quartzitos, intrusões máficas e pegmatitos intemperizados) mostrando apenas variações nos parâmetros físicos e constituindo um maciço com excelente qualidade geomecânica.

Os quartzitos em geral, mostram variação em sua coloração, fraturamento, e grau de alteração e resistência à medida que se encontram em elevações mais superiores. Há Em toda a fundação da Barragem há o predomínio do quartzito fraturado intemperizado (R3/F4/A3), medianamente alterado e resistente. Foi observado constantemente uma recorrência de variações de quartzito desde o R2 ao R4, passando pelo R3, sendo o quartzito R2 mais presente nas elevações superiores.

As intrusões e pegmatitos intemperizados mantém um padrão de ocorrência em termos de coloração e resistência, mostrando-se apenas localmente porções mais intemperizadas e resistentes nas elevações mais superiores. As intrusões em elevações mais superiores mostraram-se encaixadas na foliação do quartzito e, localmente bastante intemperizadas, chegando a forma crostas ferruginosas. Estas mudanças podem ser atribuídas principalmente a intensificação dos processos de intemperismo mais superficiais que ocorrem mais ao topo.

4. PALAVRAS-CHAVE

Barragem do Mirim, Quartzito, Mina do Salobo, Caracterização geológico-geotécnica, Intemperismo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ARAÚJO, O.J.B. & MAIA, R.G.N. (1991) - Programa de Levantamentos Geológicos Básicos, Programa Grande Carajás, Folha SB-22-A, Estado do Pará, DNPM/CPRM, 164p, Relatório técnico, Brasília.

[2] COSTA, J.B.S. & SIQUEIRA, J.B. (1991) - Transtração e transpressão ao longo do Lineamento Cinzento, Revista Brasileira de Geociências, 20, 4-20, 234-238p, Brasil.

[3] DOCEGEO (1988) - Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás, Congresso Brasileiro de Geologia, Anais 35, SBG, p.10-54, Belém.

[4] CRUZ, P. T. (1996) - 100 Barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projeto, Oficina de Textos, 647p. São Paulo.

[5] LINDENMAYER, Z. (1990) - Salobo, Carajás, Brazil: Geology, Geochemistry and Metamorphism. Western Ontário, University of Western Ontário, Department of Geology, 405p, Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Geology, University of Western Ontario.

[6] PINHEIRO, R. V. L.; HOLDSWORTH, R. E. (1997) - Reactivation of Archaean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil, Journal Geological Society, London, v. 154, p. 99-103.

[7] SIQUEIRA, J.B. (1990) - Organização litoestrutural do dúplex Salobo-Mirim, Serra dos Carajás, PA. Belém. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 125p. Tese (Mestrado em Geologia) - Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, UFPA, 1990.

[8] VASQUEZ, M.L.; ROSA-COSTA, L.T. da (orgs.). (2008) - Geologia e recursos minerais do estado do Pará, CPRM, Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil - PGB. Belém.

Autores:



Daniele GONÇALVES

Mestre em Geologia pela UFPa, Especialista em Lavra de Minas a céu aberto, Especialista em Geotecnia e segurança de pilhas e barragens e Estabilidade de taludes. Geóloga formada pela UFPa. Atua na BVP como Geóloga-geotécnica no Acompanhamento Técnico em Obras de Barragens e Diques bem como no apoio a projetos de Barragens e de Avaliação e Estabilização de taludes.



Ayla KEPPEL

Engenheira Geóloga formada pela UFOP-MG, atualmente pós-graduanda em Engenharia em Geotecnia pela PUC de Minas Gerais. Atua na BVP na área de geotecnia aplicada à mineração, com ênfase em mapeamento geológico-geotécnico, interpretação de sondagens, modelagem geológico-geotécnica e estudos de estabilidade para obras de engenharia**.**



Luciene ALMEIDA

Mestre em Geologia Estrutural /Tectônica pela UFOP-MG. Engenheira Geóloga formada pela UFOP-MG. Atua na BVP como geóloga-geotécnica em projetos geotécnicos nas áreas de Mineração e Hidroenergia, incluindo barragens, pilhas de estéril/rejeito e descaracterização. Ampla experiência em mapeamento em mapeamento geológico-geotécnico e estrutural em minas a céu aberto e subterrânea, obras civis, pilhas de estéril e barragens de rejeito e hidrelétricas.



Carlos LIMA

Mestre em Geologia pela UFPa. Especialista em Geotecnia, Especialista em Geotecnia e segurança de pilhas e barragens pela UFOP. Geólogo formado pela UFPa. Atua como Gerente de Geotecnia/ RTFE na VALE Metais Básicos na Mina do Salobo.



Hugo CAMPELO

Especialista em Sistema Minero-Metalurgico com Ênfase em Cobre pela UFOP. Engenheiro de Minas formado pela UFPa. Atua como Gerente Geral de Serviços Técnicos na Vale Metais Básicos na Mina do Salobo.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS
TEMA SR.2
BELÉM – PA, 23 DE SETEMBRO DE 2026

SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS DAS ROCHAS METAMÓRFICAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO. DISCUSSÃO SOBRE NOMENCLATURA VISANDO UNIFICAÇÃO DE CONCEITOS PARA MODELAGEM GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA.

Andres Miguel GONZALEZ ACEVEDO
Geológo – Intertechne

Mariana MAZZARI
Graduanda em Geologia – UFPR

Filipe Bento de GODOI
Geólogo – Intertechne

Emerson de Senna DIOGO
Engenheiro de Minas/Civil – Intertechne

Gilvan SÁ
Geológo – Intertechne

RESUMO

Este trabalho discursa sobre a nomenclatura normalmente utilizada para descrever os produtos de intemperismo de rochas metamórficas, principalmente nos boletins de sondagens, visando a unificação no âmbito da modelagem 3D. No Quadrilátero Ferrífero, a mineração representa uma das principais atividades econômicas, devido à alta concentração de minerais estratégicos. No aproveitamento destes recursos, gera-se uma quantidade expressiva de material de rejeito, o qual é disposto geralmente em estruturas do tipo barragens. As construções destas barragens, por muitas vezes as mais antigas, não apresentam projetos de estudos conceituais, básicos ou de execução, ou as informações das investigações realizadas apresentam uma variabilidade alta quanto à definição dos materiais encontrados. Para realizar esta discussão, foram consultadas as principais normas nacionais, como a NBR 6502 (ABNT, 2022), DNIT 198/2021 (DNIT, 2021), a ABGE 109/2024 (ABGE, 2024), entre outras, de maneira a comparar as definições apresentadas em cada uma. A pesquisa foi fundamentada principalmente nos solos residuais, caracterizado pelo intemperismo *in situ* de rochas metamórficas, as quais apresentam texturas reliquiares que definem superfícies críticas na avaliação anisotrópica dos materiais em situações de análise de estabilidade. O resultado propõe uma classificação que unifica o material descrito nas sondagens em relação à presença ou ausência de estruturas reliquiares, levando em consideração a resistência à penetração no ensaio SPT e posição espacial.

ABSTRACT

The weathering products of metamorphic rocks, particularly on drilling-borehole logs, aiming to standardize them within the scope of 3D modeling. In the Quadrilátero Ferrífero, mining represents one of the main economic activities due to the high concentration of strategic minerals. In the exploitation of these resources, a significant amount of waste material is generated, which is usually deposited in dam-type structures. The construction of these dams often lacks conceptual, basic, or execution design studies, or the information from the investigations carried out shows high variability regarding the definition of the materials encountered. To conduct this discussion, the main Brazilian standards were consulted, such as NBR 6502 (ABNT, 2022), DNIT 198/2021 (DNIT, 2021), and ABGE 109/2024 (ABGE, 2024), among others, to compare the definitions presented in each of them. The research was based mainly on residual soils, characterized by in-situ weathering of metamorphic rocks, which present relict textures that define critical surfaces in the anisotropic assessment of materials under stability analyses. The result proposes a classification that unifies the material described in the borehole logs in relation to the presence or absence of relict structures, considering the penetration resistance in the SPT test and the material's spatial position.

1. INTRODUÇÃO

A mineração constitui uma das principais atividades econômicas do Brasil, com destaque para o Quadrilátero Ferrífero, região caracterizada pela elevada concentração de recursos minerais estratégicos. O aproveitamento desses recursos gera grandes volumes de rejeitos provenientes do beneficiamento mineral, historicamente dispostos em estruturas do tipo barragens. A segurança dessas estruturas depende diretamente da adequada caracterização geológico-geotécnica dos materiais que compõem suas fundações, ombreiras e áreas de influência, bem como da qualidade dos modelos utilizados para subsidiar projetos e análises de estabilidade. Nesse contexto, destaca-se que grande parte do substrato geológico do Quadrilátero Ferrífero é constituída por rochas metamórficas submetidas a intensos processos de intemperismo tropical, resultando na formação de perfis de solos residuais heterogêneos, marcados por transições graduais e pela presença frequente de estruturas reliquiares. Essas características tornam a descrição e a classificação desses materiais especialmente complexas, sobretudo em boletins de sondagem, nos quais a variabilidade terminológica pode dificultar a correlação entre unidades e comprometer a consistência dos modelos geológico-geotécnicos. Assim, este trabalho discute uma proposta de classificação unificada para solos residuais derivados de rochas metamórficas, visando reduzir ambiguidades descritivas e contribuir para a elaboração de modelos tridimensionais mais consistentes e análises geotécnicas mais confiáveis.

1.1 Objetivo

O principal objetivo do trabalho é discutir uma classificação unificada para os materiais derivados do intemperismo de rochas metamórficas, baseada em critérios observáveis em sondagens geológico-geotécnicas, de modo a reduzir a variabilidade terminológica existente nos boletins de sondagem e a aumentar a consistência dos modelos geológico-geotécnicos utilizados em análises de estabilidade de barragens.

1.2 Justificativa

A segurança de barragens de rejeitos depende diretamente da adequada caracterização geológico-geotécnica dos materiais de fundação e entorno. Em regiões com solos residuais derivados de rochas metamórficas, os perfis apresentam elevada complexidade, com anisotropia, estruturas reliquiares e transições graduais entre solo e rocha. Nesse contexto, a qualidade da descrição de sondagens é determinante para a construção de modelos geológico-geotécnicos confiáveis e para análises de estabilidade consistentes. No entanto, a variabilidade terminológica entre boletins de sondagem compromete a correlação estratigráfica e introduz incertezas na modelagem tridimensional do subsolo. Assim, a padronização da nomenclatura, baseada em critérios geológico-geotécnicos consistentes, reduz ambiguidades e melhora a confiabilidade dos modelos e das avaliações de segurança [1].

2. CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

2.1 Caracterização Geológica do Quadrilátero Ferrífero

O Quadrilátero Ferrífero (QFe) constitui uma das principais províncias minerais do sudeste do Brasil, localizado no estado de Minas Gerais [2]. Trata-se de um domínio

geológico de idade Pré-Cambriana, caracterizado por um arranjo estrutural em bloco, cujos limites são definidos por relevos elevados resultantes de processos de erosão diferencial, conforme descrito por Barbosa e Rodrigues [3].

No contexto estratigráfico, amplamente estudado por Dorr [4], o QFe apresenta uma subdivisão clássica em seis unidades litoestratigráficas principais: os Complexos Metamórficos, o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas, o Supergrupo Espinhaço, o Supergrupo Estrada Real e as Suítes Intrusivas Máficas e Ultramáficas. Essa organização reflete a complexa evolução geológica da região, marcada por múltiplos eventos tectono-metamórficos e magmáticos.

Dentro desse contexto geológico-tectonico, identifica-se que as principais litolologias associados ao metamorfismo são os xistos e filitos devido a facilidade geoquímica de formação dessas rochas.[5]

2.2 Solos Residuais

O Brasil encontra-se, majoritariamente, inserido em um contexto de clima tropical, condição que favorece o desenvolvimento de solos residuais em função da intensa atuação dos processos de intemperismo físico-químico [6]. Segundo Riedel [7], diversos autores comentam que os problemas de instabilidade de taludes em solos residuais ou em rochas alteradas são mais comuns em regiões desse tipo de clima e que o estudo de estruturas reliquiares é de grande importância para o entendimento dessa instabilidade.

Por definição, solo é todo material resultado de decomposição e desintegração das rochas. De acordo com Chiossi [8], os solos podem ser divididos em dois grandes grupos: os residuais resultados do intemperismo da rocha e os solos transportados. No caso dos solos residuais, Larcer e Becker [9] os subdividem em dois grupos: solo residual jovem e solo residual maduro.

No caso do solo residual jovem, o material ainda preserva parte das estruturas da rocha mãe (protólito), como foliações, xistosidade e fraturas. Diferente do solo residual maduro, o qual não apresenta mais essas características, além de possuir menor resistência e maior presença de porosidade [10].

2.2.1 Estruturas Reliquiares

Os solos residuais jovens apresentam um meio termo entre a rocha original (protólito) e o solo em desenvolvimento [11]. Devido a essa transição, é comum que estes apresentem descontinuidades pertencentes a rocha mãe (protólito), denominadas estruturas reliquiares, como plano de acamamento, xistosidade, foliação, falhas, entre outras [12]

As estruturas reliquiares mais comuns em solos residuais jovens de rochas metamórficas incluem acamamentos, foliações e bandamentos, pois esses materiais preservam feições estruturais da rocha-mãe durante a evolução intempérica [12]. No Quadrilátero Ferrífero, essa característica é compatível com a presença de unidades metavulcânicas e metassedimentares submetidas a metamorfismo regional de baixo grau, especialmente em fácies xisto-verde, o que favorece a manutenção dessas estruturas no perfil de alteração [13].

2.2.1 Anisotropia

Segundo Caixeta [14], a anisotropia é a característica de certos materiais apresentarem comportamentos diferentes de acordo com a direção analisada. Na geologia ela se faz presente desde os minerais com refração de luz, até na própria geologia estrutural onde a formação de foliação e xistosidade, característica de xisto e filitos apresentam uma alta orientação de minerais em determinada direção conferindo resistência diferentes para cada direção.

Na geotecnia, a anisotropia avança para a esfera das propriedades mecânicas para cada material visto que conforme mencionado anteriormente, para cada direção pode apresentar planos de resistência diferentes. Conforme descrito por Araujo [15], as rochas metamórficas como xistos, filitos e gnaisses apresentam resistência à compressão menores no plano paralelo a foliação ou a xistosidade, enquanto no plano obliquo ou perpendicular sua resistência é maior.

Na esfera do solo residual jovem, Silva [16] realizou o estudo o comportamento geomecânicos de filitos da região do quadrilátero ferrífero por meio de ensaios de cisalhamento direto. No estudo foi verificado que houve uma redução no valor da coesão nos ensaios realizados na direção paralela a xistosidade. Além disso, no estudo realizado por Conterato [17] em solo residual jovem de filito da Formação Batatal, encontrou-se uma redução de resistência na direção paralela a foliação em comparação com a direções obliquias, onde o filito na direção paralela apresentou coesão zero em relação a 23 kPa do oblíquo. Representando a influência da anisotropia nos solos residuais.

3. REFERENCIAL NORMATIVO

3.1 Normas Técnicas

A caracterização de materiais derivados do intemperismo demanda a adoção de referenciais normativos que orientem tanto a descrição quanto a classificação dos materiais encontrados em campo e em sondagens. No contexto das barragens de rejeitos, onde decisões de projeto e análises de estabilidade dependem fortemente da qualidade e consistência dessas informações, o uso de normas técnicas consolidadas torna-se essencial para reduzir ambiguidades e promover uma comunicação técnica padronizada entre diferentes profissionais e instituições. Nesse sentido, as principais normas e diretrizes técnicas nacionais plicáveis à classificação de solos, como a ABNT NBR 6502/2022 [18], a norma DNIT 198/2021 [19] e a norma para descrição e classificação de sondagens ABGE 109/2024 [20] foram analisadas a fim de apresentar suas definições e identificar possíveis convergências e/ou divergências conceituais, especialmente no que se refere à descrição de produtos de intemperismo com estruturas reliquiares.

3.1.1 ABNT NBR 6502/2022 – Rochas e Solos

De acordo com a terminologia da ABNT NBR 6502/2022 [18], solos residuais são caracterizados pela sua formação *in situ* decorrente da decomposição da rocha matriz, devido à ação de intemperismo físico e químico. A norma também define termos para solo residual jovem e maduro, na qual estabelece que solo residual jovem é um solo residual que possui decomposição parcial ou incompleta da rocha-mãe, preservando resquícios de estrutura da rocha original, já solo residual maduro é definido como um solo residual de decomposição completa da rocha matriz, sem apresentar estruturas

reliquiares. Além disso, o documento determina saprólito como material oriundo da alteração de rocha, em fase avançada de decomposição, porém mantendo a estrutura primitiva da rocha e assemelhando-se a ela em todos os aspectos visuais aparentes, exceto quanto à cor.

3.1.2 DNIT 198/2021

Conforme a terminologia definida por esta norma [19], solos residuais são solos originários da decomposição *in situ* de rocha, à medida que a velocidade de decomposição é superior à de retirada ou transporte por meios naturais. Inserido nesta classificação, a norma diferencia solo residual entre solo residual maduro e solo saprolítico (ou saprólito), sendo solo residual maduro aquele que se apresenta homogêneo, sem presença de estrutura original e é superficial, ou está sob um colúvio ou horizonte poroso, enquanto o solo saprolítico é caracterizado como um material que preserva a maior parte da estrutura original da rocha – como feições estruturais, foliação, fraturas e veios – mas não possui a consistência como de rocha. O documento também destaca que solo saprolítico é igualmente chamado de solo jovem ou de solo de alteração de rocha.

3.1.3 ABGE 109/2024

Esta norma apresenta os critérios para descrição e classificação geológico-geotécnica de sondagens. Segundo a norma [20], solo residual é classificado como um solo formado *in situ* (não transportado), heterogêneo, também chamado de solo de alteração), e é subdividido em maduro e jovem ou saprolito (Figura 1).

	Gênese		Critério	Classificação	Sigla	Classificação opcional e sigla	
		DEPÓSITO TECNOGÊNICO	Solo ou Solo + Detritos	**Aterro**	**AT**	–	
Solo	Transportado		Nível de base atual	**Aluvião**	**AL**	–	
		FLUVIAL	Nível de base superior	**Terraço Fluvial**	**TF**		
		MARINHO		**Sedimentos Marinhos**	**SM**	Mangue (MA)	
		EÓLICO		**Sedimentos Eólicos**	**SE**	Duna (DU)	
		GRAVITACIONAL	Somente solo	**Coluvião**	**CO**	–	
			Solo + Blocos de rocha	**Tálus**	**TL**		
	Não Transportado (In situ)		HOMOGÊNEO	**Eluvião**	**EL**	Solo Residual	**Maduro (SRM)**
			HETEROGÊNEO	**Solo de Alteração/ Solo Residual**	**SA/SR**		**Jovem (SRJ)/ Saprolito (SAP)**
	Situação específica: Sedimentos Terciários (argilas, areias, etc...)		Solos de Bacias Terciárias	Sedimentos da Bacia de São Paulo (ou outra)	**SBSP**	–	

Figura 1 – Modelo de padronização de classificação geológica (genética) de solos. Fonte: Norma ABGE 103/2023, retirado de ABGE (109/2024).

A norma ainda faz alguns apontamentos: (1) a coluna "Classificação Opcional" aponta para classificações ainda usadas; (2) recomenda-se a utilização do termo "Solo Residual" para solo derivado de rocha sedimentar e "Solo de Alteração" quando derivado de rochas ígneas e metamórficas; (3) quando não é possível separar os dois tipos de solo, usa-se o termo "Solo Resíduo-Coluvial" ou "Elúvio-Coluvial"; (4) a classificação "Saprolito" ou "solo saprolítico" é caracterizado como um material

heterogêneo que pode possuir fragmentos de rocha e corresponde ao solo de alteração; (5) esse modelo de classificação é adaptável para os aspectos geológicos de cada região.

Entretanto, além dessa classificação, a Norma ABGE 109/2024 reúne e adapta modelos clássicos utilizados na descrição de materiais associados a perfis de alteração e intemperismo, incluindo contribuições atribuídas a Deere e Patton (1971), Monticeli (1986), Vaz (1996) e Themag (2012) [20]. Com base em Deere e Patton (1971), a norma apresenta um modelo de perfil de alteração no qual o solo residual, presente no perfil de intemperismo, é desenvolvido *in situ* a partir do intemperismo mecânico e químico, e é classificado em três zonas: IA, IB, IC (Figura 2).

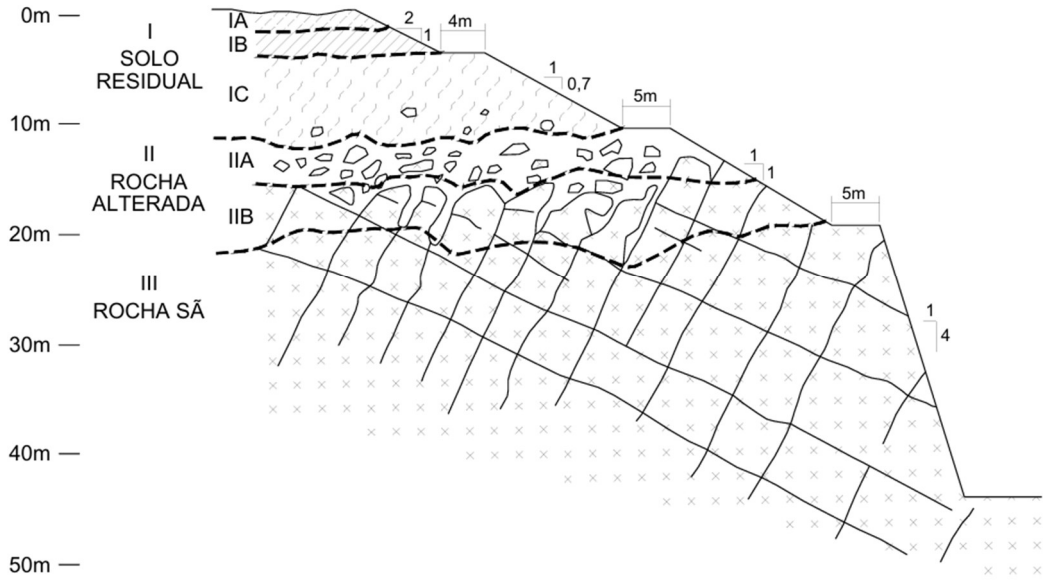


Figura 2 – Perfil de alteração derivado de rochas metamórficas e ígneas. Fonte: Deere e Patton (1971), retirado de ABGE (109/2024).

De acordo com os autores, a descrição de cada zona é a maneira mais plausível para distingui-las, dessa maneira, caracterizam-se como:

a) IA: solo superficial marcado pela presença de raízes e matéria orgânica, localizado na zona de lixiviação e eluviação, apresenta permeabilidade relativa de média a alta e resistência relativa de baixa a média;
b) IB: solo residual sem a presença de estruturas reliquiares, situado em uma zona com elevada presença de argila e concentração de Fe, Al e Si, possui baixa permeabilidade relativa e baixa resistência relativa;
c) IC: solo residual contendo estruturas reliquiares, com gradação para materiais siltosos e arenosos, normalmente micáceo e com presença de matações abaixo de 10%, apresenta permeabilidade relativa média e resistência relativa de baixa a média e também é chamado de saprólito.

A partir do modelo de Deere e Patton (1971), a Norma ABGE 109/2024 apresenta uma nomenclatura genética para a descrição geológica de perfis de alteração, atribuída a Monticeli (1986) e modificada do referido modelo original, conforme ilustrado na Figura 3 [20]. Conforme apresentado pela norma, o perfil de alteração contempla solos transportados, solos formados *in situ*, transição solo-rocha e rocha

propriamente dita. No conjunto dos solos formados *in situ*, distinguem-se o solo residual maduro, também denominado eluvião, caracterizado pela ausência ou presença reduzida de vestígios da rocha original, e o solo residual jovem, correspondente a estágios de rocha extremamente alterada ou friável, com presença significativa de vestígios da rocha-mãe. Para a separação e nomenclatura dos materiais, especialmente na transição solo-rocha, a norma indica a utilização de parâmetros geotécnicos, como o SPT [20].

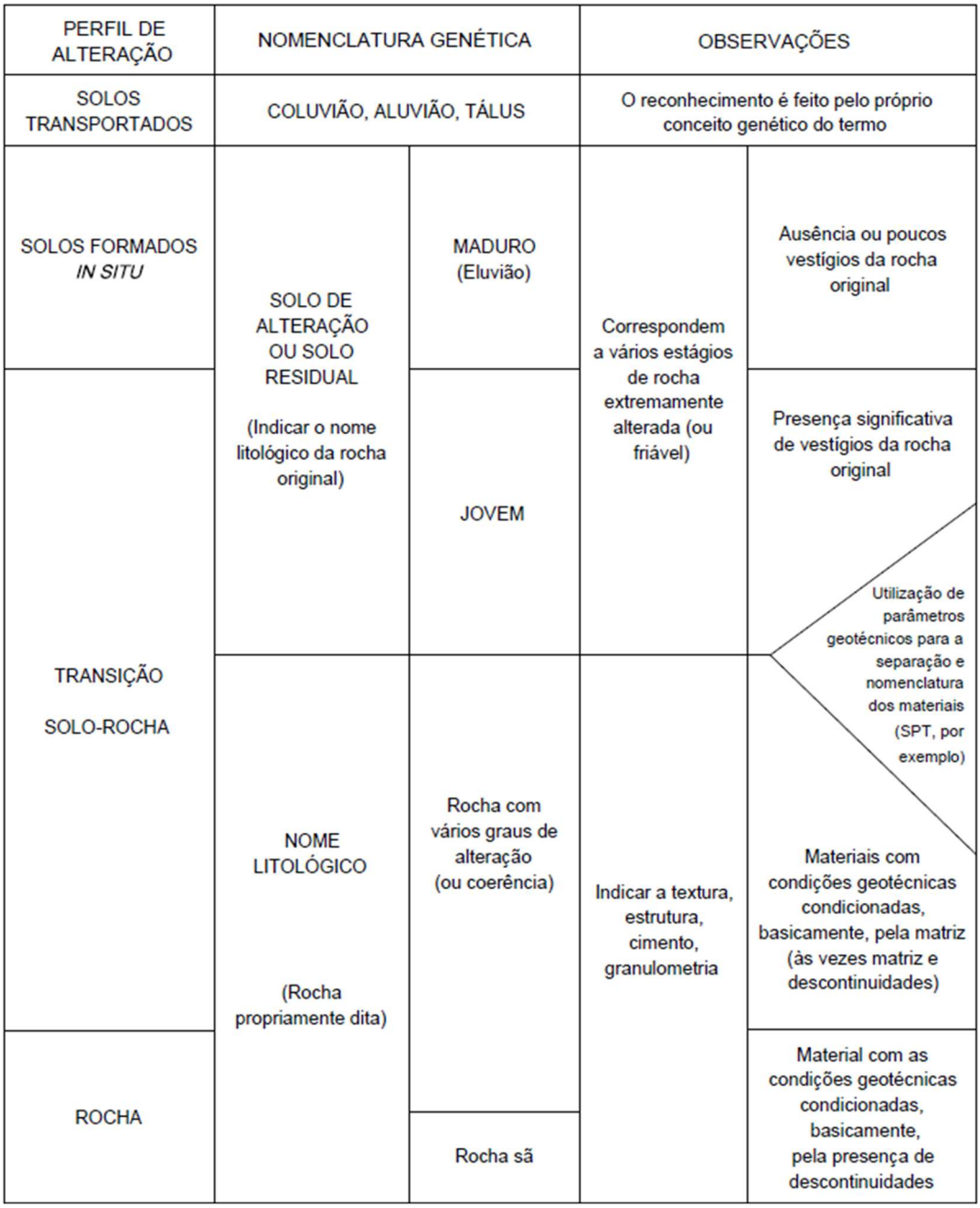


Figura 3 – Perfil de alteração para descrição geológica. Fonta: Monticeli (1986), modificado de Deere e Patton (1971), retirado de ABGE (109/2024).

Destaca-se, ainda, algumas considerações feitas para este perfil: (1) saprólito ou saprolito é uma denominação evitada, sendo empregada para ocasiões de transição solo-rocha; (2) a indicação de residual é mais apropriada para rochas sedimentares.

Ainda conforme apresentado pela Norma ABGE 109/2024 [20], o modelo atribuído a Vaz (1996) representa um perfil de intemperismo típico de regiões tropicais, no qual o solo residual compreende o solo vegetal, o solo eluvial e o solo de alteração ou saprólito. No referido modelo, o solo vegetal e o solo eluvial estão associados a processos pedológicos e apresentam comportamento predominantemente homogêneo e isotrópico, enquanto o solo de alteração, relacionado ao intemperismo químico, apresenta comportamento heterogêneo e anisotrópico, com características dependentes do tipo de rocha original, conforme ilustrado na Figura 4 [20]. Já no quadro atribuído à Themag (2012), também reproduzido pela Norma ABGE 109/2024, não há uma definição específica de “solo residual”. A classificação utiliza o termo “solo de alteração” como designação de um grau de alteração da rocha, caracterizado por alteração mineralógica praticamente completa, cores totalmente modificadas e transformação físico-química completa, excetuando-se os minerais resistentes, conforme apresentado na Figura 5 [20].

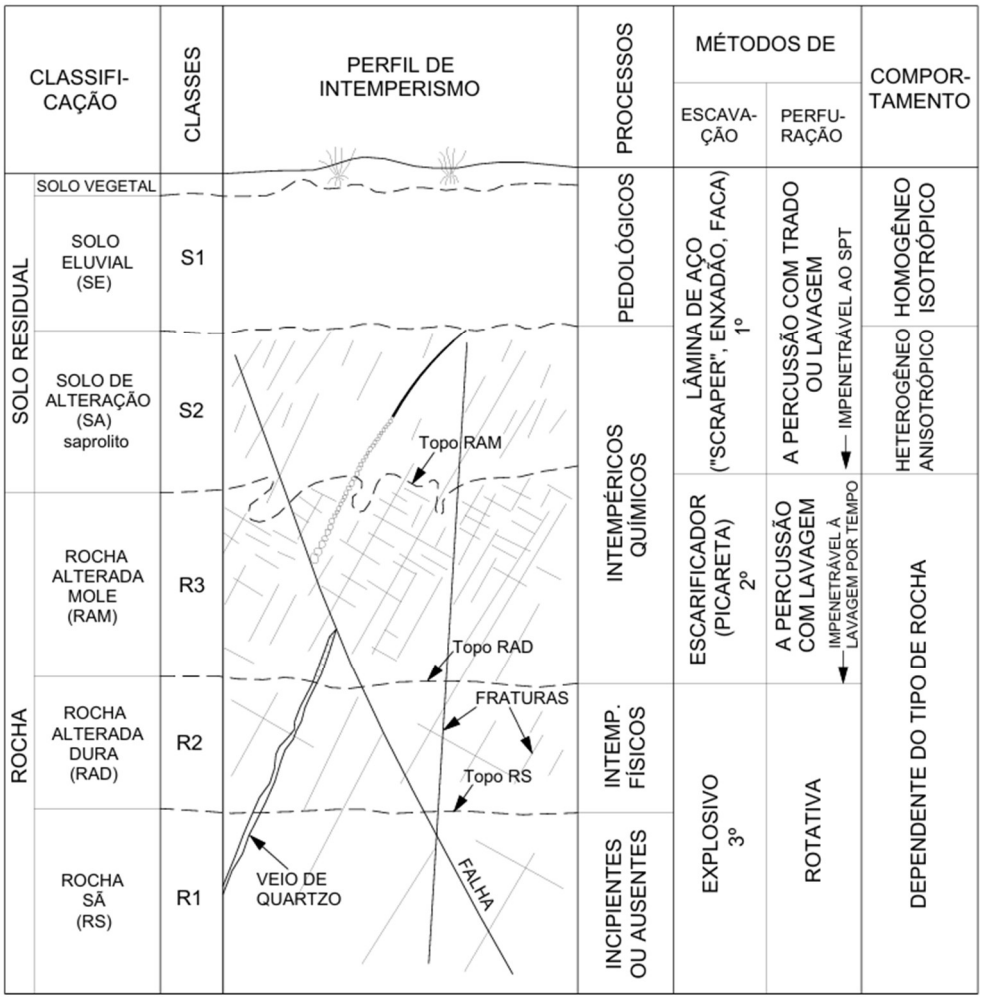


Figura 4 – Perfil de intemperismo do solo em regiões tropicais. Fonte: Vaz (1996), retirado de ABGE (109/2024).

GRAU	DESIGNAÇÃO	CARACTERÍSTICAS
A1 RS	Rocha sã	Sã ou praticamente sã. Alteração mineralógica nula ou incipiente. Cor original intacta. Escavável a fogo e perfuração com rotativa.
A2 RAD	Rocha alterada dura	Alteração mineralógica perceptível. Cores esmaecidas e pequenas transformações físico-químicas. Escavável a fogo e perfuração com rotativa.
A3 RAM	Rocha alterada mole	Alteração mineralógica acentuada. Cores parcialmente modificadas e intensa transformação físico-química. Escavável a picareta ou escarificador e perfuração com trépano e lavagem. (Ver restrição para rochas brandas.)
A4 SA	Solo de alteração	Alteração mineralógica praticamente completa. Cores totalmente modificadas e transformação físico-química completa, exceto nos minerais resistentes. Escavável a enxadão e perfuração a percussão.

Figura 5 – Grau de alteração da rocha. Fonte: Themag (2012), retirado de ABGE (109/2024).

3.2 Comparação entre Classificações

As normas ABNT NBR 6502/2022, DNIT 198/2021 e ABGE 109/2024 convergem quanto ao entendimento fundamental de que o solo residual é um material formado *in situ*, resultante do intemperismo físico e químico da rocha matriz. Apesar dessa base conceitual comum, alguns documentos apresentam terminologias diferentes quanto à subdivisão desse material (Tabela 1).

Tabela 1 – Tabela de comparação da terminologia entre as referências normativas.

Referência	Terminologia	
ABNT NBR 6502/2022	Solo residual	Maduro
		Jovem
DNIT 198/2021	Solo residual	Maduro
		Solo saprolítico / Saprólito / Solo de alteração / Jovem
ABGE 109/2024	Solo residual / Solo de alteração	Maduro
		Jovem
Deere e Patton (1971), apresentado em ABGE 109/2024	Solo residual	IA
		IB
		IC / Saprólito
Monticeli (1986), apresentado em ABGE 109/2024	Solo residual / Solo de alteração	Maduro
		Jovem
Vaz (1996), apresentado em ABGE 109/2024	Solo residual	Vegetal
		Eluvial
		Solo de alteração / Saprólito

Referência	Terminologia
Themag (2012), apresentado em ABGE 109/2024	Solo de alteração

A ABNT NBR 6502/2022 [18] distingue o solo residual entre solo residual maduro e solo residual jovem, e adicionalmente, define separadamente o saprólito como um material em estágio avançado de alteração. A norma DNIT 198/2021 [19] também separa o solo residual entre maduro e jovem, contudo também utiliza os termos “saprólito”, “saprolito” e “solo de alteração” como sinônimo de solo residual jovem. Já para a norma ABGE 109/2024 [20], o termo “solo residual” é equivalente ao termo “solo de alteração” e é subdividido em solo residual maduro e solo residual jovem.

Além disso, a Norma ABGE 109/2024 [20] também reúne diferentes modelos de descrição de perfis de alteração. No modelo atribuído a Deere e Patton (1971), o solo residual é formado *in situ* pelo intemperismo da rocha e subdividido em zonas de alteração. A nomenclatura atribuída a Monticeli (1986) diferencia solos transportados, solos formados *in situ*, transição solo-rocha e rocha, separando o solo residual em maduro e jovem. Já Vaz (1996) apresenta, para regiões tropicais, a subdivisão do solo residual em solo vegetal, solo eluvial e solo de alteração ou saprólito. Por fim, o quadro atribuído à Themag (2012) trata o solo de alteração como um estágio avançado de alteração da rocha [20].

4. DESCRIÇÃO DE MATERIAIS EM BOLETINS DE SONDAGEMErro! Indicador não definido.

4.1 Variabilidade Descritiva em Sondagens

O processo de descrição de uma sondagem geotécnica corresponde ao registro sistemático das características dos materiais interceptados durante a investigação, sendo uma etapa fundamental para a interpretação geológico-geotécnica do subsolo. Esse registro envolve a classificação litológica, o estado de intemperismo, a consistência e as descontinuidades, bem como a caracterização das propriedades físicas e mecânicas relevantes dos materiais [21]. Além disso, engloba a realização e interpretação de ensaios de resistência in situ [22], como o *Standard Penetration Test* (SPT), amplamente utilizado na estimativa de parâmetros geotécnicos [23, 24].

Por se tratar de um processo baseado em observações de campo e julgamento técnico, a descrição de sondagens apresenta variabilidade associada à subjetividade inerente à interpretação humana tátil-visual, a qual depende da experiência do profissional e pode variar significativamente mesmo com a existência de diretrizes normativas, sendo essa imprecisão ainda mais acentuada em zonas de transição gradual entre materiais, onde os limites entre as camadas não são claramente definidos [25]. Nesse contexto, normas técnicas, como as da ABGE, buscam padronizar os procedimentos de descrição e classificação de sondagens com o objetivo de reduzir inconsistências [20]. Contudo, mesmo com a padronização normativa, ainda ocorrem diferenças na definição de limites estratigráficos e na avaliação do grau de intemperismo ao longo dos perfis investigados [25].

Em solos residuais, essa limitação é ainda mais significativa, uma vez que são materiais de elevada heterogeneidade em função de sua formação *in situ*, a partir de

processos intempéricos da rocha-mãe [26]. Ademais, a heterogeneidade desses materiais dificulta a definição de unidades geotécnicas homogêneas e consistentes ao longo do perfil de sondagem [27]. Nos solos residuais jovens, essa complexidade é mais evidente devido à preservação de estruturas reliquiares, como foliação, xistosidade e acamamento [26]. Essas estruturas influenciam o comportamento mecânico do material e dificultam sua classificação como solo ou rocha alterada [28]. Além disso, a ausência de critérios universalmente consolidados para diferenciar solos residuais jovens e maduros, contribui para a inconsistências na sua classificação geotécnica [26].

A utilização do ensaio SPT como ferramenta auxiliar na caracterização desses materiais é uma prática comum na engenharia geotécnica [23,24], entretanto, os resultados deste ensaio não constituem uma propriedade intrínseca do solo, sendo influenciados por aspectos operacionais, condições de ensaio [29] e variabilidade do próprio material, dessa forma, não existe consenso quanto a valores específicos de N_{SPT} que permitam diferenciar de maneira objetiva os diferentes graus de evolução dos solos residuais [25]. Adicionalmente, destaca-se que o uso isolado do SPT, sem a adequada integração com a descrição geológico-geotécnica, pode aumentar a variabilidade interpretativa dos perfis de sondagem [30].

Essa falta de uniformidade nas descrições impacta diretamente as análises geotécnicas subsequentes, sobretudo aquelas relacionadas à estabilidade de taludes, pois a determinação de parâmetros como coesão e ângulo de atrito depende da correta identificação das unidades geotécnicas, sendo sensível às incertezas associadas à variabilidade dos materiais [26], uma vez que a deficiência na padronização e na qualidade das descrições compromete a confiabilidade desses modelos e limita sua aplicação em análises geotécnicas mais avançadas [25].

4.2 Implicações para a Modelagem Geológica-Geotécnica 3D

A modelagem geológica-geotécnica tridimensional constitui um processo interpretativo que integra dados de investigação, principalmente provenientes de sondagens, para representar a geometria e distribuição das unidades do subsolo [31]. No entanto, a principal limitação desse processo reside no fato de que os dados de sondagem são pontuais e representam apenas uma pequena fração do volume total do terreno, exigindo a interpolação espacial entre pontos investigados [32]. Dessa forma, a qualidade do modelo tridimensional depende diretamente da consistência e confiabilidade das descrições geológicas associadas a cada furo, já que essas informações são utilizadas como base para a definição das superfícies de contato entre unidades [33].

A variabilidade descritiva das sondagens introduz incertezas significativas no processo de modelagem [34], especialmente em solos residuais e perfis fortemente intemperizados [35]. Sendo assim, quando há inconsistências nas descrições entre furos próximos, decorrentes de interpretação subjetiva ou critérios distintos de classificação, a delimitação das camadas pode variar significativamente, introduzindo erros na reconstrução estratigráfica, impactando diretamente a definição da geometria das camadas, podendo gerar descontinuidades artificiais ou deslocamentos incorretos das superfícies geológicas no modelo [36]. Esses efeitos são particularmente críticos em regiões onde os limites entre unidades são gradacionais, dificultando a

identificação precisa das interfaces [20]. Essa propagação de incertezas é muito relevante em aplicações geotécnicas, nas quais o modelo tridimensional é utilizado para definir domínios homogêneos e atribuir parâmetros de resistência e deformabilidade [35].

A ausência de critérios uniformes de descrição tende a aumentar essa variabilidade interpretativa e a reduzir a consistência dos modelos, dificultando sua aplicação em análises de engenharia de maior complexidade [37]. Assim, a padronização das descrições geológicas, pode auxiliar a redução de incerteza e melhorar a representação do subsolo, especialmente em ambientes geológicos complexos com alta heterogeneidade [38].

5. PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO UNIFICADA

A partir da verificação das diversas classificações existentes na pesquisa realizada, é possível perceber que tanto a definição de solo residual, como a subdivisão entre solo residual maduro e jovem, converge para a maioria dos autores citados. Muitas dessas classificações se baseiam em critérios descritivos, como a presença de estruturas reliquiares ou a ocorrência de fragmentos de rocha, o que define de maneira objetiva a gênese do material.

Com base nessa conjuntura, a proposta de classificação unificada está fundamentada, principalmente, na descrição tátil-visual, considerando a presença ou ausência de estruturas reliquiares e, por consequência, na adoção dos termos “solo residual maduro” e “solo residual jovem” para identificação do tipo de solo residual, durante as atividades de descrição de sondagens, visando reduzir a variabilidade descritiva e favorecendo a compatibilização das descrições, visto que as informações de sondagens são a principal fonte de dados para a modelagem geológico-geotécnica tridimensional.

A proposta estabelece a utilização do termo “solo residual maduro” para materiais nos quais não são reconhecidas estruturas reliquiares da rocha-mãe, enquanto o termo “solo residual jovem” é empregado para descrever solos residuais que ainda preservam feições estruturais do protólito, como foliação, xistosidade, bandamento, entre outros. Contudo, em perfis tropicais, a coexistência de diferentes graus de intemperismo ao longo de pequenas variações de profundidade dificulta a distinção entre essas categorias, tornando-se insuficientes, em alguns casos, a adoção exclusiva de critérios qualitativos.

Conforme discutido por Vargas [39], a tentativa de estabelecer uma classificação rigorosa e universal para solos residuais jovens e maduros pode não ser plenamente realista, dada a natureza heterogênea e a ampla variabilidade desses solos. Nesse sentido, a adoção de critérios mais simplificados e aplicáveis à prática da engenharia pode representar uma abordagem mais eficiente. A proposição de uma classificação baseada em parâmetros mensuráveis e de fácil obtenção em campo pode contribuir para maior padronização na descrição geológico-geotécnica.

De acordo com Vaz [10], a resistência à penetração tende a aumentar com a profundidade, uma vez que os processos de intemperismo são, em geral, menos intensos nos horizontes mais profundos. Essa tendência reflete diretamente nas propriedades mecânicas dos materiais, permitindo que o ensaio SPT (*Standard*

Penetration Test) seja utilizado como uma ferramenta complementar na diferenciação dos graus de maturidade dos solos residuais ao longo do perfil.

Pesquisas como as de Jardim *et al.* [40], Herrera *et al.* [41] e Souza [42] sugerem a possibilidade de utilização de critérios baseados nos valores de N_{SPT} para essa distinção. De modo geral, classificam o solo residual maduro como aquele que apresenta valores de até 20 golpes, devido à sua maior porosidade e menor resistência, resultantes de um intemperismo mais avançado. Por outro lado, o solo residual jovem é associado a valores superiores a 20 golpes, refletindo maior resistência mecânica, menor grau de alteração e maior proximidade com a rocha de origem.

Nesse sentido, propõe-se também que o termo “saprólito”, por vezes sob a mesma definição de solo residual jovem de acordo com a referência consultada, seja utilizado para designar uma “zona de transição” entre o solo residual jovem e rocha sã, correspondente ao intervalo em que o material se apresenta como impenetrável ao SPT, porém ainda com grau de alteração alto-medio (A3-A4) e consistência média (C3-C4), motivo pelo qual ainda não pode ser classificado como rocha sã.

6. DISCUSSÃO

6.1 Vantagens da Classificação Proposta

A classificação proposta contribui para a padronização da nomenclatura utilizada na descrição de solos residuais tropicais derivados de rochas metamórficas, especialmente em boletins de sondagem aplicados à modelagem geológico-geotécnica. Ao adotar os termos solo residual maduro, solo residual jovem e saprólito com critérios definidos, reduz-se a variabilidade interpretativa entre diferentes profissionais e campanhas de investigação.

Em materiais de intemperismo de rochas metamórficas com textura de foliação, xistosidade e bandamento, como os decorrentes de filitos, xistos e gnaisses, mais comumente encontrados em grande parte do Quadrilátero Ferrífero, a classificação de solos residuais, particularmente na distinção entre materiais jovens e maduros, é fácilmente identificável pela presença de estruturas reliquiares. Por vezes, pode ser desafiador devido que o intemperismo em si pode fazer parecer uma textura de um tipo de rocha em específico como a de outra, por exemplo, alguns bandamentos gnaissicos como parecendo textura de xistos. Para isto, o profissional encarregado de descrever as diversas amostras deve realizar uma localização espacial da amostra, no caso do furo de sondagem, de maneira a relacionar o contexto geológico onde se encontra com a amostra a ser descrita. Isto, constitui um desafio significativo, sobretudo para profissionais com menor experiência em descrição de campo.

Pode ser complementado que, o principal critério da proposta, o qual é a descrição tátil-visual realizada pela equipe de sondagem, poderá ser integrado com critérios geotécnicos, como informação complementar e de grande valia para projetos geotécnicos-geomecânicos. A presença ou ausência de estruturas reliquiares permanece como critério central, enquanto o valor de N_{SPT} é utilizado como parâmetro complementar, auxiliando a classificação em situações em que a descrição tátil-visual não é suficiente.

Adicionalmente, a aplicação destes critérios, conforme a proposta apresentada, contribuirá para a padronização das classificações entre diferentes profissionais e equipes técnicas, reduzindo a variabilidade interpretativa frequentemente observada em campanhas de investigação geotécnica. A dependência de uma descrição tátil-visual bem feita, abrangendo os padrões mínimos da ABGE - Guia de boas práticas (Livro 3), irá resultar em uma descrição que, mesmo com deficiências, especialmente em materiais de transição, podem ser uma melhor aproximação dos materiais presentes. Destaca-se também que, a utilização de um parâmetro numérico como a resistência à penetração do ensaio SPT (N_{SPT}), se torna um complemento e favorece à definição destes materiais.

Outro aspecto relevante refere-se à maior eficiência no processo de tomada de decisão durante as etapas de investigação. A adoção de um critério simples e objetivo permite a classificação mais ágil dos materiais ainda em campo, contribuindo para a otimização do tempo e para a redução de incertezas preliminares. Esse ganho é particularmente importante em projetos de barragens, nos quais a correta caracterização dos materiais exerce influência direta nas análises de estabilidade, percolação e comportamento deformacional.

Além de reduzir a subjetividade da classificação, a adoção de parâmetros numéricos auxilia na organização e integração dos dados geológico-geotécnicos em bancos de dados, seções interpretativas e modelos tridimensionais. Com isso, a proposta favorece a correlação entre furos de sondagem, melhora a representação espacial das unidades do maciço e contribui para análises mais consistentes ao longo das etapas de projeto Além disso, constitui uma abordagem prática e operacional para projetos de engenharia.

6.2 Limitações e desafios

A descrição tátil-visual, principal critério de classificação e de definição destes materiais de intemperismo, irá depender da experiência do profissional que faz a descrição, da natureza e/ou origem do material quanto à rocha-mãe e subjetividade da descrição.

A contextualização do ambiente, no sentido de localização espacial da amostra, também representa um importante detalhe no que se considera quanto à descrição, visto que fatores como a morfologia do relevo, pode favorecer o desenvolvimento de perfis de alteração de maneira diferencial, nas porções concavas em muito maior escala que em porções convexas.

Isto sem considerar que, em regiões antropizadas, o profissional pode enfrentar o desafio de ter amostras que possam representar um material diferente ao real, podendo levar a interpretações de materiais de maneira errada, como por exemplo, espessuras relativamente grandes de material visualmente homogêneo, que poderia ser considerado como um solo residual maduro, onde existe um aterro feito com material de uma mesma jazida, que se apresente igualmente homogêneo.

Quanto à complementação realizada pela resistência à penetração dada pelo ensaio SPT (N_{SPT}), se tem que, apesar de alguns autores como os previamente citados, definem que solos residuais maduros apresentam NSPT até 20 golpes, não deve ser tomado como práxis que materiais com esse número de golpes ou menores, sejam classificados exclusivamente por esse critério, sem considerar a descrição tátil-visual.

Condições como saturação, desconfinamento por escavação e/ou proximidade com a superfície, pode influenciar na resistência de solos com estrutura reliquiar presente, pelo que não todo solo residual jovem tem resistência acima de 20 golpes. Por esse motivo, a descrição do material somente pelo N_{SPT} deveria ser evitado.

A utilização de um único parâmetro, como o número de golpes pode não ser suficiente, dado as questões regiões e complexidade dos solos residuais. Além disso, devido a heterogeneidade dos solos pode apresentar certas diferenças para uma classificação simples.

Um outro limitador é a influência das condições de execução do ensaio de SPT em relação ao valor do SPT. Isso porque variações no procedimento, ou até no equipamento pode afetar os resultados. Introduzindo incertezas que não estão diretamente relacionadas às características intrínsecas do solo.

7. CONCLUSÕES

O artigo trouxe como ponto focal a discussão sobre as classificações existentes nas normas e referências bibliográficas nacionais sobre a descrição e classificação dos diversos materiais produto do intemperismo de rochas, principalmente rochas metamórficas, no intuito de unificar e convergir com base em critérios observáveis, principalmente em amostras tomadas em sondagens geológico-geotécnicas, de maneira a tornar consistentes os dados utilizados para a elaboração de modelos geológicos-geotécnicos, a serem utilizados em análises de estabilidade.

Na revisão da literatura realizada para fundamentar a discussão, foi possível observar que as diversas normas, entre elas a NBR 6502 [18], DNIT 198/2021 [19], a ABGE 109/2024 [20], a classificação de Deere & Patton (1971) mencionada em [20] e referências como Chiossi [8] e Larcer e Becker [9], definem o solo residual em dois tipos: Solo Residual Maduro, caracterizado por ser um material homogêneo produto da decomposição completa da rocha matriz, por consequência, sem estrutura e, Solo Residual Jovem, caracterizado por ser um material que apresenta decomposição incipiente, onde está preservada a estrutura reliquiar da rocha mãe. Sendo estas classificações exclusivamente realizadas por análise e descrição tátil-visual e que devem vir com a maior discretização nos logs de sondagens emitidos oficialmente pelas executoras dos furos.

A proposta que traz como discussão esse artigo é a adoção desta classificação já nacionalmente consagrada, porém em muitos casos pouco acatada, para unificação e compatibilização de nomenclaturas de maneira a melhorar o entendimento e interpretação para avanços no quesito de modelagem 3D.

Esta diferenciação entre materiais não estruturados e materiais estruturados é de grande importância devido ao comportamento por causa da anisotropia, a qual representam superfícies que podem se tornar potenciais planos de ruptura, em muitas escalas. Desde as centimétricas, na estabilidade de taludes, quanto às macroscópicas, por causa do aumento de carregamento na implantação de estruturas de grande porte.

Como elemento complementar ao critério tátil-visual, foi encontrado na literatura que, também podem ser utilizados critérios de resistência à penetração pelo ensaio SPT (N_{SPT}), para auxiliar na definição destes materiais de intemperismo. Considerando

então que solos residuais maduros apresentam N_{SPT} até 20 golpes, solos residuais jovens até o impenetrável.

Como parte desta discussão, se propõe definir, além dos solos residuais maduros e solos residuais jovens, à transição entre o material alterado impenetrável e a rocha alterada. Utilizando para isto, um termo mais amplo e descrito nas normas e outras referências como saprólito. Esta definição do material, também considerado dentro das definições como parte do material residual, se irá considerar impenetrável ao ensaio SPT e, apresentando características de alteração alta e consistência média, até a transição a uma rocha menos alterada (A4-A3) e de maior consistência (C4-C3).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. (2017) – “Tropical residual soils as dam foundation and fill material”, Bulletin 151, ICOLD, Paris.

[2] CASTRO, P. T. A.; MACHADO, M. M. M. (2018) – “Um texto sobre Peter Claussen e a geologia em Minas Gerais: redimindo cientistas”, 8º Simpósio Nacional de Ensino e História de Ciências da Terra, Sociedade Brasileira de Geologia, Campinas, Brasil, p. 674-678.

[3] BARBOSA, G. V.; RODRIGUES, D. M. S. (1967) – “Quadrilátero Ferrífero”, IGC/UFMG, Belo Horizonte.

[4] DORR II, J. V. N. (1969) – “Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil”, U.S. Geological Survey Professional Paper 641-A, U.S. Geological Survey, Washington, 110 p.

[5] MAPA, A. F. M. N. (2023) – “Caracterização petrográfica e geoquímica das rochas encaixantes da Mina de Fábrica Nova – Quadrilátero Ferrífero (MG)”, Monografia n. 473, Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Geológica, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 65 f.

[6] LUCARELLI, D. C.; PITANGA, H. N.; MARQUES, M. E. S.; SILVA, T. O. (2023) – “Análise geotécnica e microestrutural de dois solos residuais tropicais da região de Viçosa, visando aplicação em pavimentação”, Contribuciones a las Ciencias Sociales, v. 16, n. 9, p. 18647-18670. DOI: 10.55905/revconv.16n.9-286.

[7] RIEDEL, P. S. (1994) – “Condicionantes estruturais na estabilidade de taludes: uma abordagem regional, com apoio de técnicas de sensoriamento remoto”, Tese de Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. DOI: 10.11606/T.18.1994.tde-26082024-101339.

[8] CHIOSSI, N. J. (2013) – “Geologia de engenharia”, 3. ed., Oficina de Textos, São Paulo, ISBN 978-85-7975-083-0.

[9] LACERDA, W. A.; BECKER, L. B. (2025) – “Estabilidade de taludes em solos residuais e coluvionares: teoria e prática”, 1. ed., Interciência, Rio de Janeiro, 322 p. ISBN 9788571935167.

[10] VAZ, L. F. (1996) – “Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais”, Solos e Rochas, v. 19, n. 2, p. 117-136, São

Paulo, August 1996.

[11] TOLEDO, M. C. M. (2014) – “Intemperismo e pedogênese”, in: Geologia, Ambiente na Terra, tópico 7, USP/UNIVESP/EDUSP, São Paulo, p. 134-157.

[12] VITTO, R. (2016) – “Análise do comportamento geológico-geotécnico aplicada à estabilidade de um talude – Camboriú, SC”, Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Graduação em Geologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 104 p.

[13] KATTAH, J. C. R. F. (2018) – “Arcabouço tectono-estratigráfico da região periclinal da Anticlinal de Mariana – Quadrilátero Ferrífero, MG”, Monografia n. 313, Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 122 f.

[14] CAIXETA, R. M. (2020) – “Contribuições para o uso de anisotropias locais na geoestatística”, Tese de Doutorado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

[15] ARAÚJO, R. L. (2020) – “Caracterização geológico-estrutural de rochas de comportamento anisotrópico e correlação com propriedades mecânicas – Caso do metaconglomerado do Grupo São Roque, São Paulo, Brasil”, Dissertação de Mestrado em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 142 p.

[16] SILVA, E. M. (2006) – “Análise de estabilidade de taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do Quadrilátero Ferrífero”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 143 p.

[17] CONTERATO, F. (2023) – “Estudo do comportamento geomecânico de um solo residual de filito de Minas Gerais”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 121 p.

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2022) – “NBR 6502: Solos e rochas – Terminologia”, ABNT, Rio de Janeiro.

[19] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. (2021) – “DNIT 198/2021 – TER: Solos e agregados naturais – Terminologia”, DNIT, Brasília, 22 p.

[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. (2024) – “Norma ABGE 109/2024: Descrição e classificação de sondagens”, 1. ed., ABGE, São Paulo, ISBN 978-65-88460-28-3.

[21] WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. (2022) – “Geotechnical Design Manual”, M 46-03.16, Environmental and Regional Operations, Construction Division, Geotechnical Office, Washington State Department of Transportation, Olympia, February 2022.

[22] CLAYTON, C. R. I.; MATTHEWS, M. C.; SIMONS, N. E. (1995) – “Site Investigation”, 2. ed., Blackwell Science, USA.

[23] ALMINHAS, P. M. C. (2022) – “Prospeção Geotécnica e Ensaios In Situ. Parâmetros a obter dos Ensaios SPT”, Relatório de Estágio, Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 135 p.

[24] ROGERS, J. D. (2006) – “Subsurface Exploration Using the Standard Penetration Test and the Cone Penetrometer Test”, Environmental & Engineering Geoscience, v. 12, n. 2, p. 161-179. DOI: 10.2113/12.2.161.

[25] DE MIO, G. (2005) – “Condicionantes geológicos na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental”, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

[26] MANDISODZA, K. T.; DUNN, M. J. (2019) – “Geotechnical design and uncertainty in residual soil slopes”, Mining Geomechanical Risk 2019, J. Wesseloo (ed.), Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia, p. 475-492, ISBN 978-0-9876389-1-5, DOI: 10.36487/ACG_rep/1905_29_Mandisodza.

[27] HUAT, B. B. K.; TOLL, D. G. (2013) – “Introduction”, in: HUAT, B. B. K.; TOLL, D. G.; PRASAD, A. (ed.), Handbook of Tropical Residual Soils Engineering, cap. 1, p. 1-20, CRC Press, Boca Raton.

[28] SINGH, H.; HUAT, B. B. K. (2013) – “Formation and classification of tropical residual soils”, in: HUAT, B. B. K.; TOLL, D. G.; PRASAD, A. (ed.), Handbook of Tropical Residual Soils Engineering, cap. 2, p. 21-63, CRC Press, Boca Raton.

[29] SCHNAID, F. (2000) – “Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações”, cap. 2, p. 9-39, Oficina de Textos, São Paulo.

[30] ROCHA, B. P.; MORAIS, T. S. O.; RODRIGUES, R. A.; ESQUIVEL, E. R.; GIACHETI, H. L. (2015) – “Considerações sobre a execução e a interpretação de ensaios SPT”, 8º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia; 2ª Feira da Indústria de Fundações e Geotecnia, São Paulo, Brasil, 23 a 25 de junho de 2015, 10 p.

[31] LARK, R. M.; MATHERS, S. J.; THORPE, S.; ARKLEY, S. L. B.; MORGAN, D. J.; LAWRENCE, D. J. D. (2013) – “A statistical assessment of the uncertainty in a 3-D geological framework model”, Proceedings of the Geologists’ Association, v. 124, p. 946-958. DOI: 10.1016/j.pgeola.2013.01.005.

[32] MITELMAN, A. (2024) – “Machine Learning Analysis of Borehole Data for Geotechnical Insights”, Geotechnics, v. 4, n. 4, p. 1175-1188. DOI: 10.3390/geotechnics4040060.

[33] BAYNES, F. J.; PARRY, S. (2022) – “Guidelines for the development and application of engineering geological models on projects”, IAEG Commission 25 Occasional Publication n. 1, International Association for Engineering Geology and the Environment, 130 p.

[34] RANDLE, C. H.; BOND, C. E.; LARK, R. M.; MONAGHAN, A. A. (2018) – “Can uncertainty in geological cross-section interpretations be quantified and predicted?”, Geosphere, v. 14, n. 3, p. 1087-1100. DOI: 10.1130/GES01510.1

[35] CHING, J.; SCHWECKENDIEK, T. (ed.). (2021) – “State-of-the-art review of

inherent variability and uncertainty in geotechnical properties and models", ISSMGE Technical Committee 304, 219 p.

[36] GUO, J. et al. (2022) – "Multiple-Point Geostatistics-Based Three-Dimensional Automatic Geological Modeling and Uncertainty Analysis for Borehole Data", Natural Resources Research, v. 31, p. 2347-2367. DOI: 10.1007/s11053-022-10071-6.

[37] SENANAYAKE, A. I.; PENG, X.; LEWIS, E. (2023) – "Improving the quality of geotechnical datasets: a rules-based approach", 9th International Conference on Offshore Site Investigation and Geotechnics, Society for Underwater Technology, London, England, UK, September 2023, p. 461-465. DOI: 10.3723/HBOS9079.

[38] CARTER, T. G.; BARNETT, W. P. (2021) – "Improving Reliability of Structural Domaining for Engineering Projects", Rock Mechanics and Rock Engineering, 28 p. DOI: 10.1007/s00603-021-02544-6.

[39] VARGAS, M. (1951) – "Resistência e compressibilidade de argilas residuais", Provimento de Cátedra, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

[40] JARDIM, H. C. O. et al. (2018) – "Medição de energia no ensaio SPT em solo tropical do Campo Experimental da EECA/UFG – Goiânia", Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 14, n. 1, p. 261-278, Goiânia.

[41] HERRERA, L. P. R.; YACOUB, J. D.; ROCHA, B. P.; GIACHETI, H. L. (2025) – "Estudo da estabilidade de um talude em solo tropical não saturado por meio do SPT e de ensaios triaxiais", IX Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas / XIV Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Bento Gonçalves, Brasil, 17-21 November 2025, p. 1-8.

[42] SOUZA, H. A. (2025) – "Avaliação de movimento de massa do tipo rastejo em talude no bairro São Cristóvão, Ouro Preto (MG)", Monografia n. 541, Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Geológica, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 125 f.



Andrés Miguel GONZÁLEZ ACEVEDO

Graduado em Engenharia Geológica (UCV) e Geólogo pela UFPR, possui mestrado em Engenharia de Construção Civil – Geotecnia (UFPR) e Doutorado em Geologia (UFPR). Possui 16 anos de experiência em projetos de engenharia, com foco em instrumentação e monitoramento geotécnico, mapeamento geológico, investigações geológico-geotécnicas e modelagem geológica de projetos.

	**Mariana MAZZARI** Graduanda em Geologia na Universidade Federal do Paraná (UFPR) e estagiária na área de Geologia, Diretoria de Mineração, na Intertechne Consultores.
	**Filipe Bento de GODOI** Geólogo formado na Universidade Federal do Paraná (UFPR) em 2024. Possui experiência em projetos de mineração em geologia de engenharia e atua como geólogo na Intertechne Consultores (2025 – atualmente).
	**Emerson de Senna DIOGO** Engenheiro de Minas pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da UFRGS.
	**Gilvan SÁ** Graduado em Geologia pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), Mestre em Engenharia Geotécnica pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Doutor em Geotecnia pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Profissional com mais 26 anos de experiência em coordenação e gestão de projetos geotécnicos. Atualmente pós-doutorando em Engenharia de Minas pelo CEFET-MG.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS RESIDUAIS TROPICAIS EM BARRAGENS
TEMA SR.2
BELÉM – PA, 23 DE SETEMBRO DE 2026

UHE BELO MONTE - CANALÍCULOS NAS FUNDAÇÕES DE DIQUES E BARRAGENS: DESAFIOS NA ETAPA DE OPERAÇÃO

Marcelo B. BOAVENTURA
Especialista, Engenheiro Civil - Norte Energia S.A.

Joaquim P. de ÁVILA
Mestre, Engenheiro Civil - Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.

Ricardo A. ABRAHÃO
Geólogo - Ricardo Abrahão Geociências S/S.

Erlene D. KRAJEWSKI
Especialista, Engenheiro Civil - Norte Energia S.A.

Leandro C. LIMA

Técnico em Mineração - Norte Energia S.A.

RESUMO

A ocorrência de canalículos em solos tropicais residuais constitui desafio relevante para a segurança de barragens e diques implantados em fundações heterogêneas, sobretudo quando associada a surgências cuja manifestação superficial não revela, de forma imediata, o mecanismo hidráulico-geotécnico que as alimenta. Na UHE Belo Monte, esse fenômeno foi documentado em diferentes fases do empreendimento; entretanto, foi durante a etapa de operação, entre 2020 e 2025, que observações de campo, respostas dos tratamentos executados, levantamentos topográficos, inspeções com drones, boroscopia e registros instrumentais permitiram amadurecer sua interpretação. Este artigo analisa 15 intervenções realizadas nesse período, com o objetivo de apresentar a construção progressiva de um modelo interpretativo das surgências associadas a canalículos e sua tradução em critérios de diagnóstico, monitoramento e tratamento. A análise conjunta dos casos indicou que, em parte relevante das ocorrências, as surgências de água a jusante correspondiam à expressão superficial de um sistema hidráulico subsuperficial mais complexo, no qual o solo residual jovem atuava como horizonte alimentador preferencial, o solo residual maduro exercia confinamento relativo e os canalículos funcionavam como vias preferenciais de dissipação das subpressões até a superfície. A partir desse entendimento, consolidou-se uma lógica de intervenção orientada pelo mecanismo predominante, distinguindo situações em que filtros invertidos permaneciam tecnicamente proporcionais daquelas em que trincheiras drenantes mostravam-se mais aderentes à alimentação hidráulica da manifestação. Os resultados evidenciaram redução de poropressões em áreas instrumentadas, estabilização de áreas úmidas, reorganização controlada dos fluxos e redução expressiva dos volumes de materiais empregados, demonstrando que o principal legado do período foi a consolidação de um critério de discernimento técnico aplicável a manifestações semelhantes em barragens implantadas sobre solos tropicais residuais.

ABSTRACT

The occurrence of canaliculi in tropical residual soils represents a relevant challenge for the safety of dams and dikes founded on heterogeneous profiles, especially when associated with seepage manifestations whose surface expression does not immediately reveal the hydraulic-geotechnical mechanism that feeds them. At the Belo Monte Hydroelectric Complex, this phenomenon was observed in different stages of the project; however, during the operational phase, between 2020 and 2025, field observations, treatment responses, topographic surveys, drone inspections, borehole camera records and instrumentation data allowed its interpretation to be progressively refined. This paper analyzes 15 interventions carried out during this period and presents the development of an interpretative model for seepage manifestations associated with canaliculi, as well as its translation into decision criteria for diagnosis, monitoring and treatment. The integrated analysis indicated that, in several cases, downstream seepage corresponded to the surface expression of a more complex subsurface hydraulic system, in which the young residual soil acted as the preferential feeding horizon, the mature residual soil provided relative confinement, and the canaliculi worked as preferential paths for pore-pressure dissipation toward the surface. Based on this understanding, a mechanism-oriented intervention approach was consolidated, distinguishing situations in which inverted filters remained technically proportional from those in which drainage trenches proved more consistent with the hydraulic feeding mechanism. The observed results included pore-pressure reduction in instrumented areas, stabilization of wet zones, controlled reorganization of flows and significant reduction in material volumes, showing that the main legacy of the period was the consolidation of a technical discernment criterion applicable to similar manifestations in dams founded on tropical residual soils.

1. INTRODUÇÃO

A presença de canalículos em solos tropicais residuais constitui desafio relevante para a segurança de barragens e diques implantados em fundações heterogêneas. Essas cavidades tubulares, típicas de perfis profundamente intemperizados, podem atuar como caminhos preferenciais de percolação, favorecer o alívio localizado de subpressões e, em determinadas condições, contribuir para processos de erosão interna [1]. Na UHE Belo Monte, implantada em região caracterizada por solos residuais de migmatito, esse fenômeno foi observado em diferentes estruturas e fases do empreendimento, com manifestações tratadas durante a construção e no período posterior ao enchimento do reservatório [2].

Durante a etapa de operação, passaram a ser identificadas surgências em posições mais afastadas do eixo das estruturas, inclusive em ombreiras, talvegues naturais e áreas de jusante não diretamente associadas aos dispositivos convencionais de drenagem. Em muitos casos, a área úmida visível correspondia ao ponto de alívio de um sistema subsuperficial mais profundo, condicionado pela estratigrafia do perfil residual, pela conectividade entre canalículos, pela espessura do recobrimento menos permeável e pela geomorfologia local [3]. Essa condição exigiu que a interpretação deixasse de se concentrar apenas no ponto de surgência e passasse a considerar o sistema hidráulico-geotécnico responsável por sua alimentação.

Entre 2020 e 2025, foram acompanhadas e tratadas 15 intervenções associadas a surgências e canalículos em diferentes estruturas da UHE Belo Monte. A análise comparativa desses casos permitiu transformar observações inicialmente dispersas em um modelo interpretativo no qual as surgências de água a jusante passaram a ser compreendidas como manifestações superficiais de um sistema subsuperficial condicionado pela interação entre horizontes de diferentes permeabilidades, canalículos e geomorfologia local.

Nesse contexto, o presente artigo apresenta a construção progressiva desse modelo interpretativo e sua aplicação na definição de critérios de diagnóstico, monitoramento e intervenção. Busca-se demonstrar que a evolução observada em Belo Monte não corresponde à substituição de uma solução por outra, mas ao amadurecimento de uma lógica de decisão orientada pelo mecanismo predominante.

2. CONTEXTO GEOTÉCNICO E TRANSIÇÃO PARA A ETAPA DE OPERAÇÃO

A UHE Belo Monte está implantada em região caracterizada por solos residuais de migmatito, submetidos a intenso intemperismo tropical e marcados por elevada heterogeneidade ao longo da profundidade e da extensão das fundações. Esses perfis apresentam alternância entre horizontes de diferentes graus de alteração, com destaque para o solo residual maduro, em geral menos permeável, e o solo residual jovem, relativamente mais poroso e condutivo. Nesse contexto, a presença de canalículos — cavidades tubulares com geometrias, dimensões e graus variados de conectividade — constitui elemento geotécnico relevante, por sua capacidade de atuar como via preferencial de fluxo e modificar localmente o regime hidráulico das fundações.

Durante a construção, a ocorrência de canalículos foi amplamente documentada por meio de escavações, trincheiras exploratórias e tratamentos específicos. Após o enchimento do reservatório, as manifestações inicialmente observadas concentraram-se, em geral, em regiões mais próximas ao pé das estruturas, tendo sido tratadas predominantemente por filtros invertidos. Essas soluções mostraram-se adequadas em diversos contextos, especialmente quando as surgências apresentavam caráter localizado e demandavam controle da saída de água, retenção de finos e estabilização pontual da área afetada.

Entretanto, o acompanhamento posterior indicou que parte das manifestações extrapolava os trechos diretamente tratados. A partir de 2020, com as estruturas submetidas a carregamento hidráulico permanente, tornaram-se mais relevantes ocorrências em ombreiras, pequenos vales, talvegues naturais e áreas afastadas do corpo das estruturas, incluindo reaparecimento de surgências fora de áreas tratadas, ampliação de manchas úmidas, aumento do diâmetro dos canalículos e persistência de áreas encharcadas, mesmo sem turbidez ou carreamento intenso visível.

Nesse contexto, inspeções visuais, drones, levantamentos topográficos georreferenciados, boroscopia, interpretação geomorfológica e memória construtiva passaram a complementar a leitura da instrumentação convencional. Em alguns casos, parte das manifestações desenvolvia-se fora do envelope instrumental originalmente concebido para o acompanhamento global das estruturas, de modo que a ausência de resposta piezométrica expressiva não podia ser interpretada, isoladamente, como ausência de mecanismo hidráulico relevante. A transição para a etapa de operação representou, portanto, mudança na natureza do problema técnico: o desafio deixou de ser apenas localizar e disciplinar o ponto visível de surgência e passou a consistir em compreender o sistema hidráulico-geotécnico que o alimentava.

3. CONSTRUÇÃO DO MODELO INTERPRETATIVO: A BVSA COMO CASO-MATRIZ

A construção do modelo interpretativo das surgências associadas a canalículos na UHE Belo Monte resultou de processo progressivo de observação, comparação e validação em campo. Entre as diferentes ocorrências acompanhadas na etapa de operação, a Barragem da Vertente Santo Antônio (BVSA) assumiu papel central, por reunir, em uma mesma área, evidências que permitiram articular a evolução do diâmetro dos canalículos, a expansão das áreas úmidas, a leitura geomorfológica da faixa de jusante, a interpretação estratigráfica do perfil residual e a resposta hidráulica observada durante escavações exploratórias.

Sua importância não reside apenas no êxito posterior da intervenção executada, mas no fato de ter constituído o primeiro caso em que diferentes sinais de campo passaram a convergir para uma hipótese operacional coerente: as surgências não correspondiam apenas à emergência localizada de água em superfície, mas à manifestação visível de um sistema hidráulico subsuperficial mais profundo, condicionado pela interação entre solo residual jovem, solo residual maduro, rede de canalículos e geometria local de alívio.

3.1. Evidências que romperam a leitura centrada na manifestação superficial

Na ombreira esquerda da BVSA, o monitoramento sistemático dos pontos de surgência revelou comportamento inicialmente ambíguo. Em diversos pontos, a água emergente apresentava aspecto visualmente cristalino, sem turbidez aparente, condição que, em uma leitura simplificada, poderia sugerir baixo potencial erosivo. Entretanto, essa aparência contrastava com a presença de depósitos arenosos esbranquiçados junto às saídas, com surgências secundárias adjacentes e, principalmente, com o aumento progressivo do diâmetro de alguns canalículos ao longo do tempo.

Em um dos pontos monitorados, o canalículo evoluiu de aproximadamente 8 cm para 28 cm em pouco mais de um ano (Figura 1), indicando que a ausência de turbidez visível não correspondia, necessariamente, à ausência de processos internos de erosão ou reorganização hidráulica. Inspeções com boroscópio reforçaram essa interpretação ao identificar sinais de carreamento de partículas finas e evolução geométrica dos condutos. A partir dessas evidências, a criticidade da manifestação passou a ser avaliada não apenas pela aparência instantânea da água emergente, mas também pela evolução morfológica dos pontos de alívio e pelos indícios indiretos de mobilização de partículas.

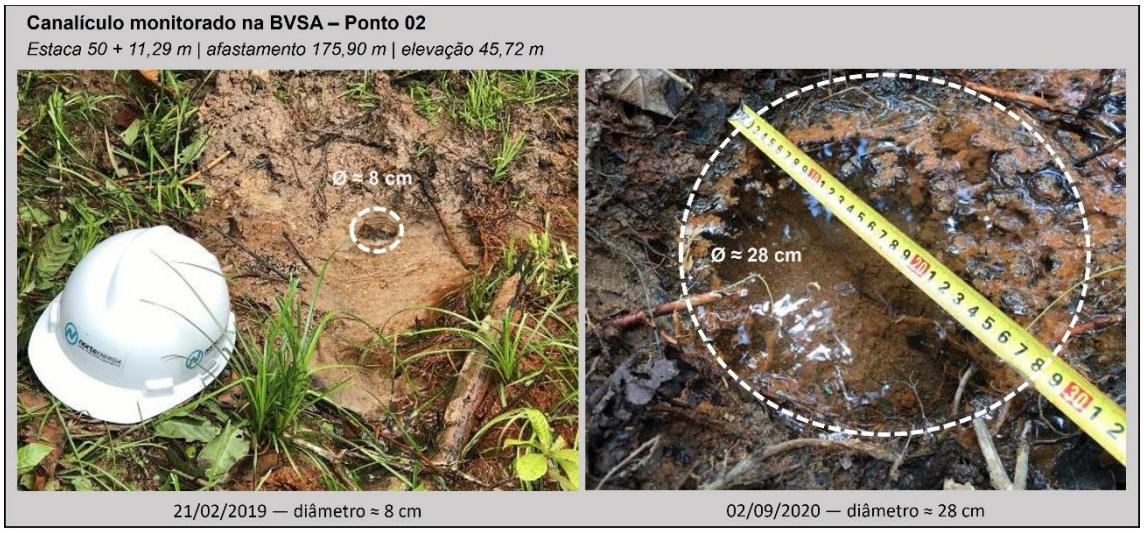


Figura 1 – BVSA: evolução geométrica de canalículo monitorado entre 2019 e 2020.

Esse entendimento representou inflexão importante: o canalículo deixou de ser interpretado apenas como cavidade isolada e passou a ser compreendido como possível interface visível de um sistema hidráulico conectado.

3.2. Leitura em duas escalas: canalículos e área úmida

A compreensão do fenômeno na BVSA tornou-se mais consistente quando as observações passaram a ser analisadas em duas escalas complementares. Na microescala, acompanhava-se a evolução individual dos canalículos, seus diâmetros, depósitos associados e indícios internos de carreamento. Na macroescala, acompanhava-se a evolução espacial da área úmida a jusante, registrada por levantamentos topográficos georreferenciados realizados ao longo do tempo.

Entre 2018 e 2020, esses levantamentos indicaram crescimento expressivo da área delimitada de surgências e umidade na ombreira esquerda da BVSA (Figura 2). A expansão da mancha úmida, quando correlacionada com a evolução geométrica dos canalículos, mostrou que os pontos de descarga não se comportavam como ocorrências independentes. Ao contrário, canalículos e área úmida passaram a ser entendidos como manifestações complementares de um mesmo sistema hidráulico subsuperficial em evolução.

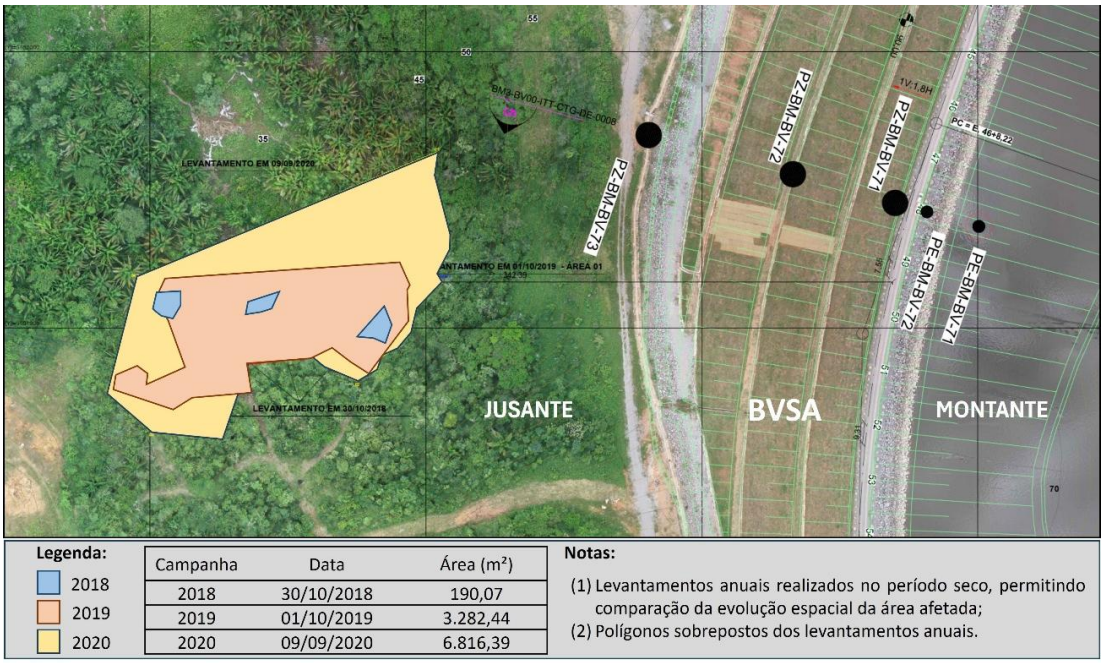


Figura 2 – BVSA: evolução da área delimitada de surgências e umidade a jusante.

Outro aspecto relevante foi o papel indireto da instrumentação existente. Os piezômetros instalados no corpo do aterro e em sua projeção imediata a jusante, mantinham comportamento estável ou com tendência de queda, mesmo diante da expansão da área afetada e da evolução geométrica dos canalículos. Essa coexistência entre leituras instrumentais aparentemente estáveis e manifestações superficiais progressivas passou a indicar que o sistema de percolação responsável pelas surgências atuava em trajetórias e profundidades não plenamente captadas pelo arranjo instrumental disponível, sem que isso significasse ausência de mecanismo hidráulico relevante.

3.3. Leitura espacial, matacões e janela geométrico-hidráulica de alívio

O ponto de inflexão mais importante para a formulação do modelo interpretativo surgiu da leitura espacial da faixa de jusante. Durante inspeções de campo realizadas em 2020, foi identificado um alinhamento errático, aproximadamente paralelo à barragem, no qual se repetia uma transição marcante entre terreno seco a montante e terreno encharcado a jusante (Figura 3). Esse alinhamento não coincidia rigidamente com uma curva de nível, mas representava uma assinatura espacial recorrente da manifestação da água na paisagem.



Figura 3 – BVSA: vista aérea destacando o alinhamento errático das surgências.

Associada a esse alinhamento, observava-se presença abundante de matacões, interpretados como blocos residuais de migmatito preservados no perfil de intemperismo e relacionados à proximidade de horizontes menos intemperizados, frequentemente associados ao solo residual jovem e ao topo rochoso (Figura 4).



Figura 4 – BVSA: registro de campo na ombreira esquerda, evidenciando a faixa de transição entre trecho seco e trecho saturado/encharcado.

A coincidência entre o alinhamento das surgências, a presença dos matacões e a distribuição das áreas úmidas contribuiu para consolidar hipótese técnica mais robusta: a água pressurizada em profundidade encontrava, naquela faixa, condições geomorfológicas e estratigráficas favoráveis para alívio até a superfície.

A partir dessa leitura, o fenômeno passou a ser interpretado como resultado de uma condição combinada de vulnerabilidade geométrico-hidráulica. O solo residual jovem, por sua maior permeabilidade relativa, atuaria como horizonte alimentador preferencial dos fluxos subsuperficiais; o solo residual maduro, menos permeável, exerceria confinamento relativo, favorecendo a pressurização em profundidade; os canalículos constituiriam vias preferenciais de dissipação das subpressões; e a geomorfologia local definiria os pontos ou faixas em que o sistema encontraria oportunidade de alívio até a superfície (Figura 5).

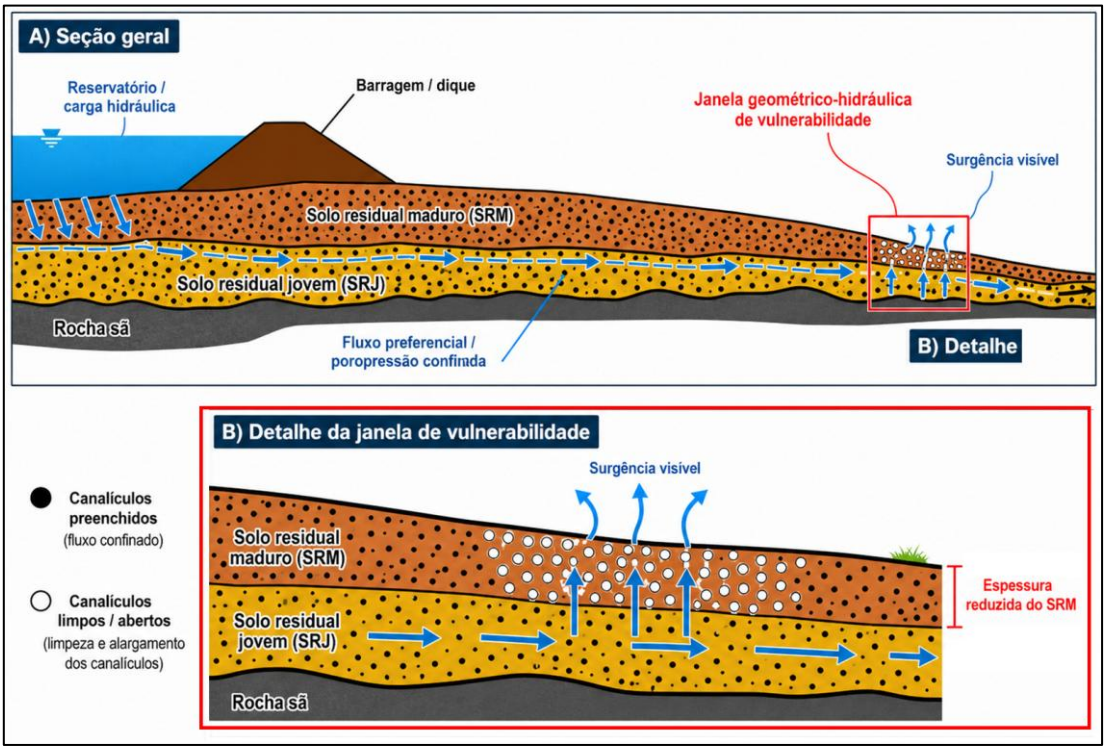


Figura 5 – Modelo conceitual do mecanismo de surgência associado aos canalículos.

Nessa formulação, a manifestação superficial deixa de ser tratada como fenômeno primário e passa a ser compreendida como produto da interação entre pressão disponível no horizonte alimentador, conectividade com a rede de canalículos, espessura remanescente do recobrimento menos permeável e geometria favorável ao alívio. Essa leitura explica por que manifestações aparentemente semelhantes podem ocorrer em posições distintas em relação ao eixo da estrutura: em alguns casos, a janela de alívio se estabelece próxima ao pé; em outros, quando o terreno natural continua descendendo para jusante ou o recobrimento menos permeável se prolonga, a surgência pode se deslocar para áreas mais afastadas, inclusive além da influência direta dos dispositivos convencionais de drenagem.

3.4. Trincheira trapezoidal como materialização da hipótese interpretativa

A interpretação construída na BVSA teve consequência direta sobre a concepção da intervenção. Se o alinhamento das surgências representava a faixa em que o sistema pressurizado encontrava condição favorável de alívio, e se a presença de matacões indicava proximidade de horizontes menos intemperizados associados ao solo residual jovem e ao topo rochoso, então a solução não deveria se limitar ao disciplinamento da água já emergente. Nesse contexto, a trincheira drenante surgiu não como inovação geométrica isolada, mas como consequência lógica da interpretação do mecanismo, cuja efetividade dependeria da precisão de sua locação em relação à janela geométrico-hidráulica identificada em campo.

Durante avaliação de campo, foi aberta uma trincheira exploratória na faixa de transição entre o terreno seco e o terreno encharcado. O comportamento observado foi particularmente expressivo: logo no início da escavação, a água emergiu com forte intensidade, em regime vigoroso e transitório, seguido de rápida estabilização em condição mais branda. Esse comportamento foi interpretado como evidência de alívio local de água previamente confinada e pressurizada em profundidade, confirmando, em escala de campo, a hipótese de que a escavação interceptava o sistema responsável pela alimentação das surgências.

A partir da convergência dessas evidências, foi concebida e executada a trincheira drenante de seção trapezoidal (Figura 6), com a finalidade de interceptar o sistema subsuperficial responsável pela alimentação das surgências e conduzir os fluxos de forma controlada. A solução foi preenchida com materiais granulares e pétreos, de modo a garantir capacidade drenante, estabilidade geotécnica e proteção contra erosão superficial.

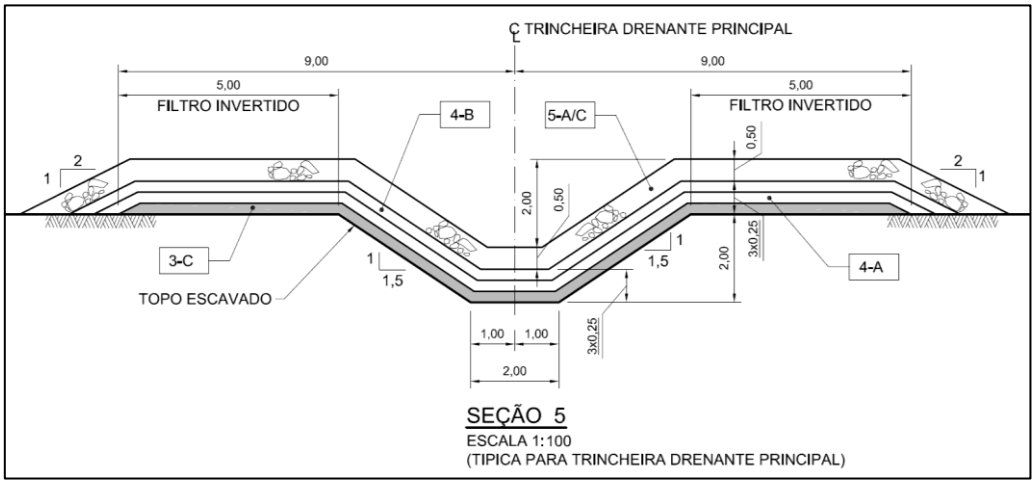


Figura 6 – BVSA: Seção esquemática da trincheira drenante trapezoidal implantada (adaptado pelo autor, BM4-BV00-ITT-CTG-DE-0010).

A execução da trincheira envolveu escavação em trechos sucessivos, controle temporário da água por bombeamento, lançamento das camadas drenantes e proteção final com enrocamento, conforme ilustrado na Figura 7. Com a implantação da solução, os fluxos passaram a migrar para o interior da escavação, reduzindo a umidade superficial nas áreas adjacentes e promovendo melhor organização da

descarga. Embora essa etapa inicial ainda não contasse com instrumentação complementar especificamente posicionada para registrar resposta piezométrica imediata na área tratada, o comportamento observado em campo indicou redistribuição favorável do regime hidráulico local.



Figura 7 – BVSA: Etapas de execução da trincheira drenante trapezoidal: (a) início da escavação; (b) conformação da geometria com apoio de bombeamento para esgotamento da água; (c) lançamento das camadas drenantes, incluindo areia, transições e enrocamento; e (d) acabamento, com conformação da trincheira e imbricamento do enrocamento.

A experiência da BVSA consolidou a transição entre observação empírica e hipótese operacional. Mais do que validar uma geometria específica, o caso demonstrou que a efetividade do tratamento dependia do reconhecimento da faixa e da profundidade em que o sistema hidráulico deveria ser interceptado, fornecendo a base conceitual para as intervenções posteriores com trincheiras drenantes verticalizadas.

4. CONSOLIDAÇÃO METODOLÓGICA NA OPERAÇÃO

A partir da formulação do modelo interpretativo das surgências a jusante, a etapa seguinte consistiu em transformar esse entendimento em método de decisão e intervenção. A experiência acumulada entre 2020 e 2025 mostrou que a evolução das soluções na UHE Belo Monte não ocorreu por substituição abrupta de uma técnica por outra, mas por sucessivos testes, contrastes e refinamentos, nos quais o comportamento observado em campo foi progressivamente convertido em critério técnico.

4.1. Da solução localizada ao critério orientado pelo mecanismo

Nas fases iniciais da operação, os filtros invertidos mantiveram papel importante, sobretudo em manifestações localizadas, confinadas ou associadas a condições

geomorfológicas favoráveis ao disciplinamento superficial da descarga. Intervenções como as executadas no Dique 1C, em 2020, e no Dique 1A, em 2021, ilustram esse contexto, no qual o controle da saída de água, a retenção de finos e a estabilização pontual da área afetada se mostravam compatíveis com a natureza da ocorrência.

Entretanto, alguns casos passaram a demonstrar que o disciplinamento local da descarga nem sempre equivalia à interceptação do sistema hidráulico alimentador. O Dique 18 foi particularmente relevante nesse sentido: após tratamento inicial, o reaparecimento da surgência em posição mais a jusante indicou que o fluxo se reorganizava em resposta à alteração das condições locais de alívio. Essa recorrência reforçou a interpretação de que, em parte das ocorrências, havia conectividade subsuperficial suficiente para deslocar a manifestação para além da área tratada, exigindo leitura mais ampla do sistema.

A partir da BVSA, essa leitura ganhou maior consistência. Quando a surgência visível era alimentada por sistema mais profundo, associado ao solo residual jovem e conectado à superfície por canalículos, a solução deveria buscar a interceptação do horizonte ativo de percolação.

4.2. Evolução das trincheiras drenantes: da geometria trapezoidal à verticalizada

A trincheira drenante trapezoidal implantada inicialmente na BVSA cumpriu papel fundamental como prova de conceito. Sua geometria refletia postura conservadora diante das incertezas existentes, especialmente quanto à estabilidade das paredes escavadas e ao comportamento hidráulico esperado durante a execução. O bom desempenho observado, com migração dos fluxos para o interior da escavação e redução da umidade superficial adjacente, demonstrou que o princípio de interceptação do horizonte ativo era tecnicamente consistente.

Com o amadurecimento do entendimento sobre o mecanismo das surgências, tornou-se possível refinar a solução executiva. A transição para trincheiras drenantes verticalizadas não alterou o conceito hidráulico central; representou, antes, uma otimização da mesma lógica. Ao concentrar o elemento drenante em seção mais estreita e profunda, a geometria verticalizada buscou ampliar a profundidade útil de interceptação, reduzir a mobilização superficial, diminuir volumes de escavação e materiais (Figura 8).

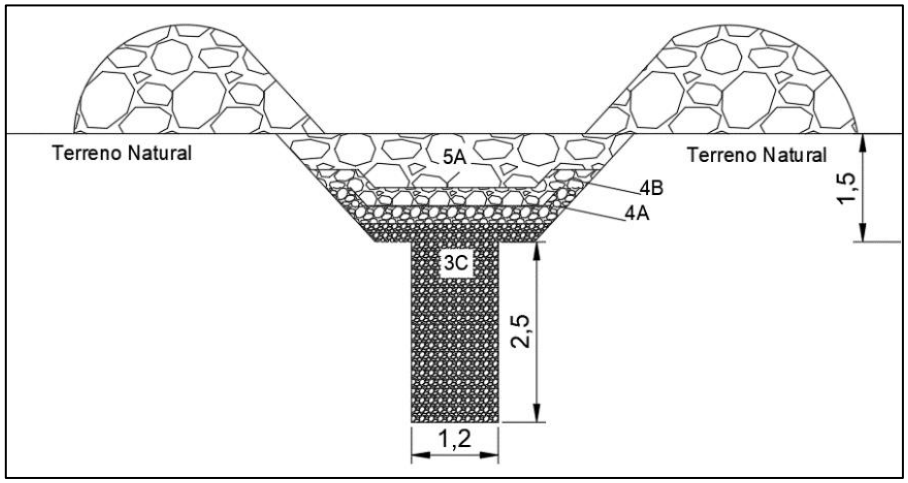


Figura 8 – Seção típica da trincheira drenante verticalizada.

Essa evolução foi construída em conjunto com o Board de Consultores do empreendimento. A execução em painéis curtos, com preenchimento imediato, respondeu às preocupações relacionadas à estabilidade das paredes escavadas, preservando a segurança executiva sem comprometer a função hidráulica da solução. Assim, a verticalização deve ser entendida como refinamento técnico-operacional da hipótese validada inicialmente na BVSA.

4.3. Dique 11: validação instrumental e operacional do método

O Dique 11 – Etapa 1, em 2022, constituiu o caso emblemático de validação da trincheira drenante verticalizada. Após o enchimento do reservatório, haviam sido identificadas surgências de água na faixa de jusante da estrutura. As ocorrências mais próximas ao pé do dique foram tratadas anteriormente por meio de filtro invertido; entretanto, permaneceram áreas úmidas e pontos de surgência em posições mais afastadas do eixo, que passaram a ser acompanhados por inspeções de campo e levantamentos topográficos.

A comparação entre a condição observada no enchimento do reservatório, em 2016, e a fase de operação, em 2022, evidenciou a evolução das manifestações a jusante (Figura 9). O crescimento da área úmida, a presença de surgências e a ocorrência de sinais associados à conectividade hidráulica reforçaram a necessidade de intervenção orientada não apenas pelo ponto de descarga visível, mas pela compreensão do sistema alimentador.



Figura 9 – Dique 11: comparação entre a condição de 2016, (a) durante o enchimento do reservatório, sem surgências visíveis a jusante, e a fase de operação em 2022, (b) com áreas úmidas e alinhamento de surgências.

Antes da implantação das trincheiras drenantes, foi instalada instrumentação complementar na faixa de jusante, com o objetivo de avaliar o comportamento hidráulico local antes e após a intervenção (Figura 10).

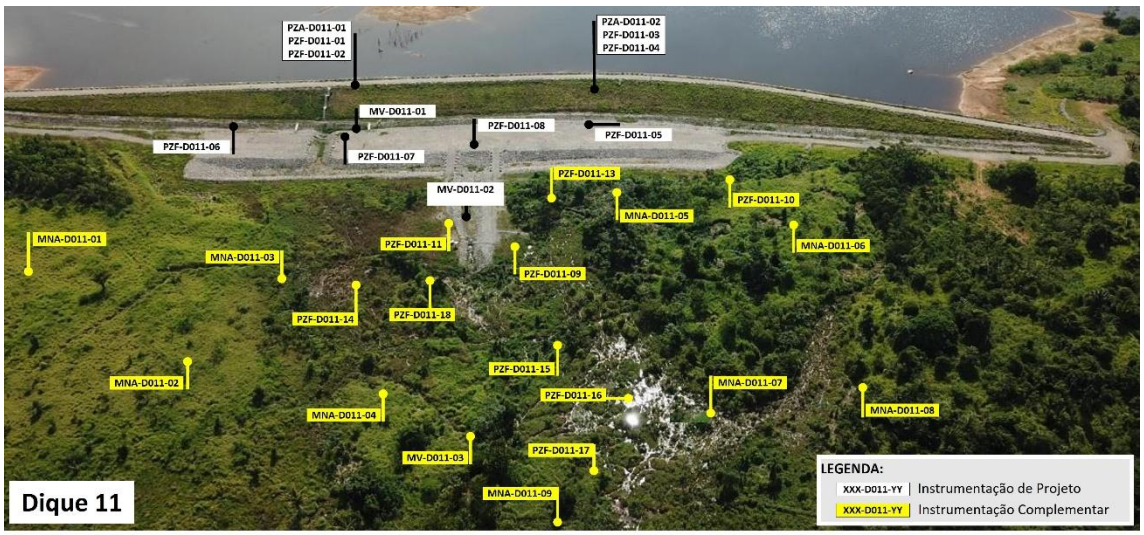


Figura 10 – Dique 11: croquis de instalação da instrumentação complementar a jusante.

Essa decisão foi particularmente importante porque parte das manifestações se desenvolvia em região não plenamente contemplada pelo arranjo instrumental original, voltado ao acompanhamento global da estrutura. A instrumentação complementar permitiu, portanto, testar de forma mais objetiva a hipótese de que as trincheiras verticalizadas promoveriam alívio das poropressões e reorganização favorável do regime de percolação.



Figura 11 – Dique 11: sequência executiva da trincheira drenante verticalizada: (a) escavação em seção estreita e profunda; (b) preenchimento com areia e início da captação dos fluxos interceptados; (c) lançamento e conformação das camadas de transição; e (d) acabamento com enrocamento.

A sequência apresentada na Figura 11 sintetiza a metodologia executiva adotada para a trincheira verticalizada, baseada em trechos sucessivos, escavação em seção estreita e profunda, preenchimento imediato com areia, lançamento das camadas de transição e acabamento com enrocamento. Essa solução materializa em campo a lógica de interceptação em profundidade, com a função de captar e conduzir os fluxos associados às surgências.

Durante a escavação da trincheira, foram acompanhados e georreferenciados canalículos ativos inicialmente identificados na superfície do terreno, com presença de fluxo de água. O acompanhamento de sua projeção ao longo do avanço da escavação mostrou que esses condutos persistiam em profundidade até a interceptação do solo residual jovem (SRJ), a cerca de 3,5 m, confirmando a hipótese de conectividade entre a superfície de surgência e o horizonte alimentador do fluxo (Figura 12). No fundo da trincheira, observou-se o disciplinamento da água interceptada, reforçando a interpretação de que a solução promovia alívio das poropressões no horizonte ativo de percolação.

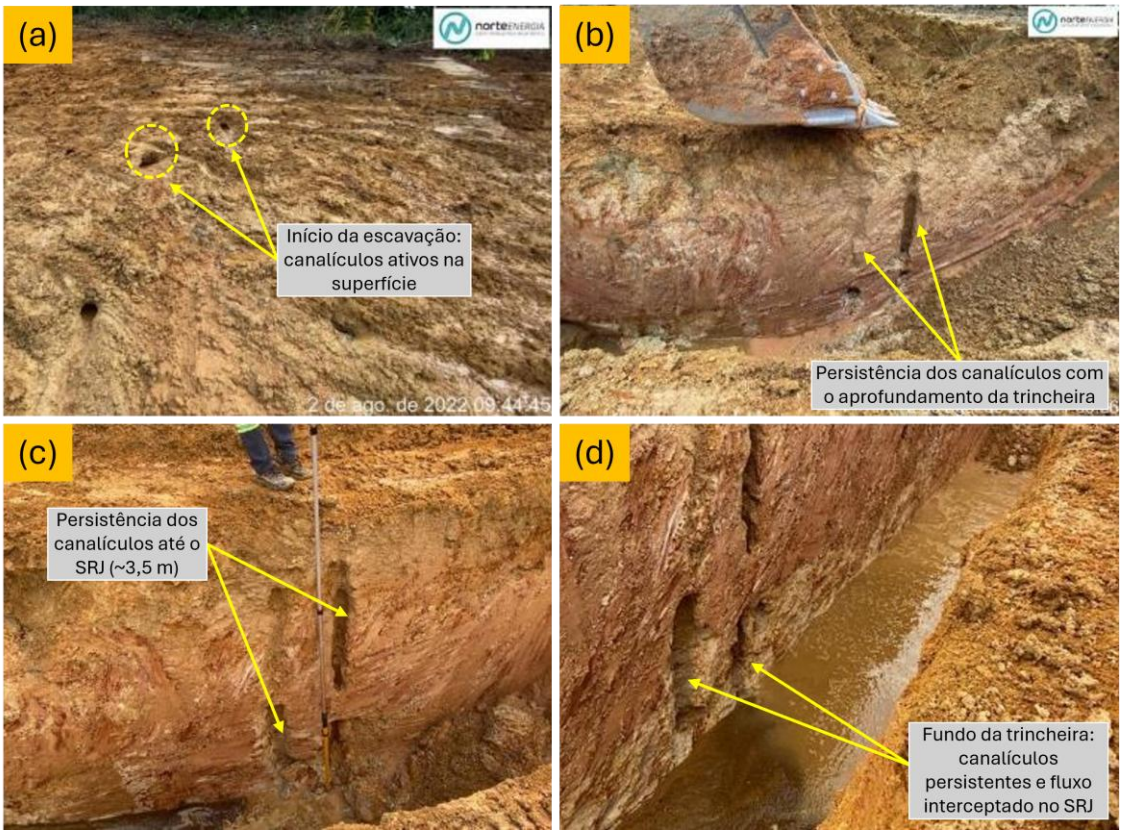


Figura 12 – Dique 11: persistência de canalículos acompanhados durante a escavação da trincheira drenante verticalizada: (a) canalículos ativos na superfície; (b) continuidade dos condutos com o aprofundamento da escavação; (c) persistência até o solo residual jovem (SRJ), a cerca de 3,5 m; e (d) fundo da trincheira, com fluxo disciplinado após a interceptação do horizonte alimentador.

Após a implantação da intervenção, os dados registrados indicaram redução das cargas piezométricas e dos níveis d'água em praticamente todos os instrumentos avaliados (Tabela 1). Essa resposta, associada à secagem progressiva da área e ao controle dos fluxos superficiais (Figura 13), conferiu robustez instrumental e operacional ao método. O Dique 11 demonstrou que a trincheira verticalizada era capaz de produzir alívio efetivo de poropressões quando adequadamente locada em relação ao sistema alimentador.

Tabela 1 – Resultados de leitura da instrumentação complementar do Dique 11.

Instrumento	Distância do Eixo do Dique (m)	Redução (m)
MNA-D011-07	78,72	2,51
MNA-D011-08	94,56	3,44
MNA-D011-09	47,31	0,82
PZF-D011-17	11,7	1,43
PZF-D011-15	3,75	0,98
PZF-D011-10	129,8	1,69
PZF-D011-16	6,22	1,81
MNA-D011-01	211,2	1,2
MNA-D011-02	130,87	1,38
MNA-D011-03	52,77	1,53
MNA-D011-04	39,5	0,25
PZF-D011-18	20,53	1,15
PZF-D011-11	46,67	0,61
PZF-D011-14	14,36	0,75



Figura 13 – Vista aérea do Dique 11 antes e depois da implantação das trincheiras drenantes, evidenciando a redução da umidade superficial.

O caso do Dique 11 reuniu validação executiva, hidráulico-geotécnica e instrumental: demonstrou a viabilidade da geometria verticalizada, evidenciou a persistência dos canalículos até o SRJ e registrou redução mensurável das poropressões e níveis

d’água. A partir dele, a trincheira drenante verticalizada passou a compor o repertório técnico da operação, sem adoção indistinta em todos os casos.

4.4. Racionalidade executiva e redução de volumes

Além da maior aderência ao mecanismo interpretado, a adoção das trincheiras drenantes trouxe ganhos expressivos de racionalidade executiva quando comparada a alternativas mais extensivas de tratamento por filtros invertidos. Em análise comparativa aplicada a 10 intervenções nas quais foram adotadas trincheiras drenantes, estimou-se que uma solução equivalente por filtros invertidos demandaria aproximadamente 133.699 m³ de materiais, enquanto as trincheiras executadas totalizaram cerca de 33.468 m³, considerando areia, transições e enrocamento. Essa diferença representa redução média da ordem de 75% no volume de materiais empregados (Tabela 2).

Embora se trate de comparação estimativa, o resultado evidencia que a intervenção orientada pelo mecanismo predominante pode concentrar o tratamento na faixa e na profundidade efetivamente necessárias ao alívio do sistema, evitando mobilizações excessivas de material e intervenções superficiais mais extensas.

Tabela 2 – Comparativo volumétrico entre filtro invertido e trincheira drenante.

Caracterização da intervenção			**Volumes de materiais**	
Ano	**Estrutura**	**Geometria da Trincheira Drenante**	**Filtro Invertido Estimado (m³)**	**Trincheira Drenante Executada (m³)**
2020	BVSA (Etapa 1)	Trapezoidal	7.703,28	4.336,00
2021	Diques 14F/14G	Trapezoidal	16.680,00	2.364,00
2021	BVSA (Etapa 2)	Trapezoidal	2.135,46	1.202,00
2022	Dique 11 (Etapa 1)	Verticalizada	20.823,90	3.390,00
2022	Dique 14D	Verticalizada	5.704,66	3.106,00
2022	Dique 27	Verticalizada	16.336,66	1.708,00
2023	Dique 11 (Etapa 2)	Verticalizada	24.848,56	4.045,19
2023	Dique 19D	Verticalizada	5.651,75	1.680,00
2024	Dique 29	Verticalizada	17.854,15	8.891,00
2025	Dique 7B	Verticalizada	15.961,00	2.745,54
TOTAL			**133.699,42**	**33.467,73**

4.5. Série histórica de intervenções e critério de decisão

A trajetória metodológica entre 2020 e 2025 pode ser sintetizada pela série histórica de 15 intervenções executadas em diferentes estruturas da UHE Belo Monte, organizada na Tabela 3.

A leitura conjunta desses casos evidencia que a evolução do período não se resumiu à adoção progressiva das trincheiras drenantes verticalizadas. O que se consolidou foi um repertório técnico no qual filtros invertidos e trincheiras drenantes passaram a

ocupar campos de aplicação distintos e complementares, definidos pelo mecanismo predominante de cada manifestação.

Tabela 3 – Síntese comparativa das intervenções executadas em 2020 a 2025.

Ano	Estrutura	Manifestação	Solução	Estágio	Resultado	Aprendizado
2020	Dique 1C	Surgência em ombreira	Filtro invertido	Resposta localizada inicial	Estabilização local da descarga	Disciplinamento superficial inicial
2020	BVSA (Etapa 1)	Canalículos com evolução geométrica e fluxo persistente	Trincheira trapezoidal	Prova de conceito	Área alagadiça reduzida e validação do horizonte ativo	Leitura estratigráfica redefiniu o tratamento
2020	Dique 18	Surgência pontual adjacente ao medidor de vazão	Filtro invertido	Resposta localizada inicial	Controle inicial da manifestação	Solução superficial pode ser proporcional em casos localizados
2021	Dique 1A	Canalículos expostos durante manutenção junto ao dreno de pé	Filtro invertido	Resposta localizada inicial	Disciplinamento imediato do fluxo	Manutenção pode revelar anomalias geotécnicas ocultas
2021	Dique 18	Reaparecimento da surgência mais a jusante após tratamento	Filtro invertido	Otimização executiva	Estabilização após complementação da solução	Recorrência confirmou conectividade subsuperficial
2021	Diques 14F/14G	Surgências em área com elevada concentração de canalículos	Trincheira trapezoidal	Otimização executiva	Fluxo disciplinado	Influência conjunta da estratigrafia e das condições de campo
2021	BVSA (Etapa 2)	Persistência em área já tratada	Trincheira trapezoidal	Prova de conceito validada	Secagem progressiva da área	Solução passou de experimental a tecnicamente legitimada
2022	Dique 11 (Etapa 1)	Expansão da área úmida e ocorrência de *sand boils*	Trincheira verticalizada	Consolidação	Redução de poropressões e secagem da área	Validação operacional de alta relevância
2022	Dique 14D	Acréscimo de canalículos com água limpa	Trincheira verticalizada	Consolidação	Fluxo disciplinado	Água limpa não exclui necessidade de tratamento
2022	Dique 27	Intensificação do fluxo com *sand boils*	Trincheira verticalizada	Consolidação	Controle preventivo	*Sand boils* são gatilho importante de intervenção
2023	Dique 11 (Etapa 2)	Surgências interconectadas persistentes	Trincheira verticalizada	Metodologia consolidada	Resposta instrumental imediata	Confirmação de elevada conectividade hidráulica
2023	Dique 13	Surgências em canaleta sob influência do lençol freático	Filtro invertido	Solução proporcional	Estabilização local	Maturidade na escolha proporcional
2023	Dique 19D	Evolução da área úmida, *sand boils* e leve carreamento	Trincheira verticalizada	Metodologia consolidada	Secagem rápida da área	Valor da intervenção preventiva e da leitura evolutiva do fenômeno
2024	Dique 29	Ampliação da área úmida e presença de canalículos	Trincheira verticalizada	Metodologia consolidada	Alta eficiência	Replicabilidade em contexto operacional maduro
2025	Dique 7B	Canalículo com carreamento e evolução geométrica	Trincheira verticalizada	Metodologia consolidada	Interceptação do horizonte preferencial	Canalículos como rede hidráulica conectada

5. LEGADO METODOLÓGICO E TRANSFERIBILIDADE DA EXPERIÊNCIA

A experiência acumulada na UHE Belo Monte entre 2020 e 2025 confere ao caso valor metodológico para a engenharia de barragens em solos tropicais residuais. As surgências associadas a canalículos passaram a ser compreendidas não apenas por sua manifestação superficial, mas como expressão de um sistema hidráulico subsuperficial condicionado pela interação entre solo residual jovem, solo residual maduro, conectividade dos canalículos e geometria local de alívio.

A experiência reforça que o diagnóstico deve integrar inspeções visuais, topografia, drones, boroscopia, instrumentação, geomorfologia, estratigrafia e memória construtiva. A ausência de turbidez visível não exclui evolução interna; a ausência de resposta expressiva em instrumentos de acompanhamento global não elimina mecanismos laterais ou mais profundos; e o ponto de surgência não coincide necessariamente com a zona em que o fluxo se organiza.

Assim, a compreensão do mecanismo predominante é fundamental para a seleção da solução a ser empregada na intervenção.

6. CONCLUSÕES

A análise da etapa de operação da UHE Belo Monte demonstrou que as surgências associadas a canalículos em solos tropicais residuais não podem ser compreendidas apenas por sua manifestação superficial. Em parte dos casos avaliados entre 2020 e 2025, a água visível a jusante correspondia à expressão de um sistema hidráulico subsuperficial condicionado pela interação entre horizontes de diferentes permeabilidades, atuação do solo residual jovem como horizonte alimentador, confinamento relativo exercido pelo solo residual maduro e presença dos canalículos como vias preferenciais de alívio.

O principal resultado do período foi a construção progressiva de um modelo interpretativo capaz de organizar sinais inicialmente dispersos, como reaparecimento de fluxos fora de áreas tratadas, crescimento de manchas úmidas, evolução geométrica de canalículos, depósitos arenosos, resposta do fluxo às escavações e limitações do arranjo instrumental original. Nesse processo, a BVSA assumiu papel de caso-matriz, o Dique 11 conferiu robustez à interpretação hidráulico-geotécnica e à validação executiva e instrumental da metodologia, e os casos posteriores demonstraram sua replicabilidade e seu potencial preventivo.

A série histórica de 15 intervenções mostrou que o amadurecimento técnico não se traduziu na adoção de solução única, mas na consolidação de critério de decisão orientado pelo mecanismo predominante. Em contextos localizados, confinados ou associados a horizontes permeáveis próximos ao terreno natural, o filtro invertido permaneceu proporcional. Em manifestações em faixa, evolutivas ou associadas a conectividade hidráulica, *sand boils*, carreamento ou alimentação em profundidade, a trincheira drenante mostrou-se mais aderente por atuar sobre o horizonte ativo de percolação.

A experiência de Belo Monte demonstra que observações de campo, respostas instrumentais e aprendizagem acumulada podem ser convertidas em método de

leitura, decisão e intervenção para barragens implantadas sobre solos tropicais residuais.

7. PALAVRAS-CHAVE

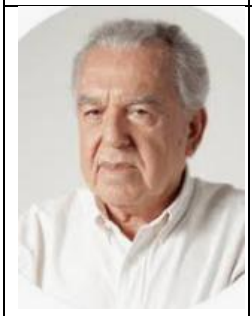
Canalículos; surgências a jusante; solos tropicais residuais; segurança de barragens; trincheiras drenantes; critério de intervenção.

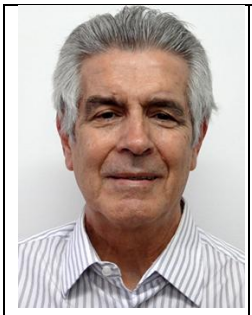
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LIMBERGER, A. E., et al. (2023). Ocorrência de Canalículos em Fundações de Barragens da Região Amazônica – Estado da Arte. XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Tema 129, Foz do Iguaçu, 2023.

[2] BOAVENTURA, M. B. et al. UHE Belo Monte - Canalículos nas Fundações de Diques e Barragens: Desafios nas Etapas de Construção e Pós-Enchimento do Reservatório. XXXV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Tema 134, Porto Alegre, 2025.

[3] BOAVENTURA, M. B. et al. Occurrence of Canaliculi and Treatments in the Foundations of the Belo Monte Hydroelectric Complex During Construction and Operation. Fifth International Dam World Conference – Dam World 2025, Lisboa, 2025.

	**Marcelo Braga BOAVENTURA** Engenheiro Civil (UFPA, 1998), MBA em Gestão Empresarial (FGV, 2009) e Gerenciamento de Projetos (FGV, 2015), especialista em Segurança de Barragens (IDD, 2023). Gerente de Segurança de Barragens da Norte Energia S.A., com atuação em monitoramento, manutenção e Plano de Ação de Emergência.
	**Joaquim Pimenta de ÁVILA** Engenheiro Civil (UFMG, 1970); especialista em Barragens de Terra (University of Missouri – USA, 1976) e mestre em Engenharia de Solos (USP, 1981). Desde 1989 atua como Diretor e Engenheiro Consultor da Pimenta de Ávila Consultoria Ltda. Possui mais de 45 anos de experiência em trabalhos geotécnicos multidisciplinares, com atuação no Brasil e no exterior.

	**Ricardo Antônio ABRAHÃO** Geólogo (USP, 1971). Desde 2006 atua como Diretor na Ricardo Abrahão Geociências S/S, atuando no Brasil e no exterior com consultorias em Geologia de Engenharia e Mecânica das Rochas. Coordenou projetos de várias usinas hidrelétricas e do Projeto Básico da Transposição do Rio São Francisco. Colaborou em mais de uma centena de obras de infraestrutura e recursos hídricos.
	**Erlene Diogo KRAJEWSKI** Engenheira Civil formada pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC, 2014), especialista em Gestão de Projetos (IDD, 2016) e em Segurança de Barragens (IDD, 2025). Atua na Norte Energia S.A. em atividades de gestão, planejamento, controle e segurança de barragens.
	**Leandro Lima CARVALHO** Técnico em Mineração formado pelo Sistema Organizacional Técnico Regular (SOTER, 2009). Possui experiência em controle de qualidade de construção, geotecnia, geologia e execução de intervenções em barragens, diques e obras civis.

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.