



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

RBGEA

REVISTA BRASILEIRA DE
GEOLOGIA DE ENGENHARIA
E AMBIENTAL

Volume 14 (01)

2024

ISSN 2237-4590



**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL**

REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Publicação Científica da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

EDITORES

Prof. Dra. Alessandra Cristina Corsi – IPT
Prof. Dr. Eduardo Soares de Macedo – Consultor

REVISORES

Adalberto Aurélio Azevedo – Consultor	José Eduardo Zaine – UNESP
Alberto Pio Fiori – UFPR	José Luiz Albuquerque Filho – IPT
Aline Freitas da Silva – DRM-RJ	José Mário Queiroga Mafra – Walm Engenharia
Ana Elisa Silva de Abreu – UNICAMP	Leonardo Andrade de Souza – Zemlya
Andrea Valli Nummer – UFMS	Leandro Eugênio da Silva Cerri – Consultor
Candido Bordeaux Rego Neto – IPUF	Luis de Almeida Prado Bacellar – UFOP
Clovis Gonzatti – CIENTEC	Luiz Fernando D’Agostino – Núcleo
Denise de la Corte Bacci – USP	Luiz Nishiyama – UFU
Diana Sarita Hamburger – UFABC	Malva Andrea Mancuso – UFMS
Edilson Pissato – USP	Marcilene Dantas Ferreira – UFSCar
Eduardo Goulart Collares – UEMG	Marcio A. Cunha – Consultor
Emilio Velloso Barroso – UFRJ	Marcio Fernandes Leão
Eraldo L. Pastore – Consultor	Maria Heloisa B.O. Frascá – Consultora
Fábio Soares Magalhães – Walm Engenharia	Marta Luzia de Souza – UEM
Fabricio Araujo Miranda – IPT	Nelson Meirim Coutinho – GEORIO
Filipe Antonio Marques Falcetta – IPT	Newton Moreira de Souza – UnB
Frederico Garcia Sobreira – UFOP	Noris Costa Diniz – UnB
Gerson Salviano Almeida Filho – IPT	Omar Yazbek Bitar – IPT
Helena Polivanov – UFRJ	Otávio Coaracy Brasil Gandolfo – IPT
Ivan José Delatim – SIGA	Romildo Dias Moreira Filho
João Francisco Alves Silveira – Consultor	Reinaldo Lorandi – UFSCar
Jorge Kazuo Yamamoto – USP	Ricardo Vedovello – IPA/SEMIL
José Augusto de Lollo – UNESP	Wilson Shoji Iyomasa – IPT

APOIO EDITORIAL

Denise Amaral

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

Ryan Dias – Editora Tribo da Ilha

Volume 14 (01)

2024

ISSN 2237-4590

DOI: 10.29327/241867.14.1



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

DIRETORIA ABGE GESTÃO 2025/2026

PRESIDENTE: Erik Wunder
VICE-PRESIDENTE: Luiz Alberto Minicucci
DIRETORA SECRETÁRIA: Bruna M. Cruz Fernandes
DIRETOR FINANCEIRO: Delfino Luiz Gouveia Gambetti
DIRETORA DE EVENTOS: Ana Elisa Silva de Abreu
DIRETOR DE COMUNICAÇÃO: Luiz Antonio Pereira de Souza

Conselho Deliberativo: Ana Elisa Silva de Abreu, Álvaro Rodrigues dos Santos, Bruna M. Cruz Fernandes, Camila Milli, Delfino Luiz Gouveia Gambetti, Erik Wunder, Flávio Rogério da Silva, João Antônio Curtis, João Luiz Armelin, José Luis Ridente, José Luiz Albuquerque, Lilian Pimentel, Luiz Alberto Minicucci, Luiz Antonio Pereira de Souza, Malena D'Elia Otero, Márcio Leão, Maria Heloisa B. Oliveira Frasca, Romildo Dias Moreira.

Conselho Consultivo: Fabio Soares Magalhães (Presidente), Adalberto Aurélio Azevedo (in memoriam), Carlos Manoel Nieble (in memoriam), Delfino Luiz Gouveia Gambetti, Fernando Facciola Kertzman, Fernão Paes de Barros (in memoriam), Giacomo Ré, Guido Guidicini, Jayme de Oliveira Campos, João Jerônimo Monticelli, Kenzo Hori, Luiz Ferreira Vaz (in memoriam), Luiz Francisco Saragiotto, Maria Heloisa Barros de Oliveira Frasca, Murillo Dondici Ruiz (in memoriam), Nivaldo José Chiossi, Tarcísio Barreto Celestino e Wilson Shoji Yomasa.

NÚCLEO RIO DE JANEIRO / ESPÍRITO SANTO

Alano Burity dos Santos, Ana Caroline Duarte Dutra, Ana Paula Cezario da Silva, Giovanna Tristão, Isabella Robert Rodrigues, Jéssica Tiné Pôssa, Raquel Batista M. da Fonseca e Rodrigo Ferreira Franca.

NÚCLEO MINAS GERAIS

Alberto Ferreira do Amaral Junior, Ângelo Almeida Zenóbio, Denise Silva, Diego Moreira da Silva, Ellen Delgado Fernandes, Frederico Nascimento Mendes Bezerra, Giovana Parizzi, Michele Aparecida Flores Costa, Walter dos Reis Junior e Yan Lucas de O. P. Santos.

NÚCLEO SUL

Andréa Nummer, Cezar Augusto B. Bastos, Débora Lamberty, Karina R. Camargo, Malva Andrea Mancuso, Marcos A. Musso Laespiga e Nicole Borchardt.

NÚCLEO CENTRO OESTE

Bruno Presley, Caiubi Emanuel Souza Kuhn, Ingrid Ferreira Lima, Patrícia de Araújo Romão e Ricardo Vilhena.

NÚCLEO NORTE

Claudio Fabian, Dianne D. F. Fonseca, Elton Rodrigo de Andretta, Iris Celeste N. Bandeira, José Sidney Barros e Sheila G. Teixeira.

SECRETARIA ABGE

Gerente Executiva: Luciana Marques
Assistente Editorial: Denise Amaral
Assistente Administrativo: Kauany Santos
Assistente Administrativo: Vanessa Oliveira
Auxiliar Administrativo: Emilly Mendes
Auxiliar De Comunicação: Gabrielle Lima

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - IPT (Prédio 59) - Cidade Universitária - São Paulo – SP

FONE: (11) 98687-6560

E-mail: abge@abge.org.br | Site: abge.org.br



SUMÁRIO

5 APRESENTAÇÃO

ARTIGOS CIENTÍFICOS

7 INTEGRAÇÃO DE DADOS DE GPR E ANÁLISE GEOTÉCNICA NO MONITORAMENTO DA BARRAGEM SÍTIOS NOVOS (CAUCAIA, CEARÁ)

Daniel Chaves Almeida

João Wilton Oliveira Eustáquio

Carla Beatriz Costa de Araújo

Francisco Carlos Henrique Pio de Oliveira

26 ANÁLISE DO DESLIZAMENTO TRANSLACIONAL DE 2022 NA ENSEADA DA PRAIA DE ITAGUAÇU EM ILHA GRANDE- RJ

Carolina Martins Latgé Kwamme

Francisco Dourado

41 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE BAUXITA EM UMA REGIÃO AMAZÔNICA: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Matheus Cavalcante Silva

Débora Dias Costa Moreira

Junior Hiroyuki Ishihara

Christiane do Nascimento Monte

Jadelene Ramos de Souza

Ana Cristina Cavalcante Selfe

Carlos David Veiga França

CONTRIBUIÇÃO E REFLEXÃO

57 ASSISTÊNCIA TÉCNICA REFERENTE AOS TÚNEIS DO PROJETO ASTÚRIAS, NICARÁGUA - RELATÓRIO FINAL

Aldérico José Marchi

João Jeronimo Monticelli



APRESENTAÇÃO

Estamos apresentando a primeira edição de 2024 da RBGEA – Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, a revista da ABGE. A Editoria e a equipe de apoio da ABGE estão enviando esforços para que antes de maio deste ano coloquemos em circulação a segunda edição de 2024. Nesta edição reunimos três artigos técnico-científicos e uma contribuição.

No primeiro desses artigos, Daniel Chaves Almeida e colegas do Programa de Pós-graduação em Geologia, da Univ. Federal do Ceará, utilizaram dados de GPR (Ground Penetrating Radar) na Barragem Sítios Novos, no Ceará, em conjunto com dados geotécnicos e concluíram pela aplicabilidade do GPR como ferramenta auxiliar no monitoramento de barragens.

Já Carolina Martins Latgé Kwamme e Francisco Dourado, ambos da Univ. do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), apresentam estudo sobre o movimento de massa ocorrido em abril de 2022, na praia de Itaguaçu, na Ilha Grande (RJ). Após análise dos dados obtidos em trabalhos de campo auxiliados por levantamentos aéreos com drone, os autores propõem duas hipóteses para explicar o movimento de massa ocorrido.

O terceiro artigo, de autoria de Matheus Cavalcante Silva, da Universidade Federal do Pará,

em parceria com vários autores de outras instituições, trouxe uma revisão sobre as características de rejeitos de mineração de bauxita em uma região Amazônica, visando subsidiar ações de controle de riscos em sistemas de disposição de rejeitos de bauxita.

Na seção Contribuições e Reflexões publicamos material enviado pelo colega João Jerônimo Monticelli. Trata-se de relatório de trabalhos executados, em 1985, pelo próprio João Jerônimo e pelo Engenheiro Aldérico José Marchi, ambos a serviço da Companhia Energética de São Paulo (Cesp). O relatório, escrito em espanhol, detalha os trabalhos no Projeto Asturias, na Nicarágua, abordando os túneis e administração do projeto. O texto preparado por João Jerônimo para acompanhar a publicação do relatório nesta edição da RBGEA, contém mais informações sobre o trabalho.

Participe de nossa revista enviando seu artigo técnico, seu texto de reflexão, seu comentário ou sua sugestão para que possamos juntos fazer da RBGEA a revista de divulgação e integração da Geologia de Engenharia e Ambiental no Brasil.

Desejamos a todos uma ótima leitura.

ARTIGOS CIENTÍFICOS

INTEGRAÇÃO DE DADOS DE GPR E ANÁLISE GEOTÉCNICA NO MONITORAMENTO DA BARRAGEM SÍTIOS NOVOS (CAUCAIA, CEARÁ)

INTEGRATION OF GPR DATA AND GEOTECHNICAL ANALYSIS IN THE MONITORING OF THE SÍTIOS NOVOS DAM (CAUCAIA, CEARÁ)

DANIEL CHAVES ALMEIDA

Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, daniel.almeida.geo@gmail.com

JOÃO WILTON OLIVEIRA EUSTÁQUIO

Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, wiltoneustaquio49@gmail.com

CARLA BEATRIZ COSTA DE ARAÚJO

Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, carlabeatriz@ufc.br

FRANCISCO CARLOS HENRIQUE PIO DE OLIVEIRA

Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, franciscocarlospho@gmail.com

RESUMO ABSTRACT

O monitoramento geotécnico de barragens é atualmente realizado, principalmente, por métodos convencionais como inspeções visuais e medidas de instrumentações como medidores de nível d'água, piezômetros e marcos superficiais, todavia estes fornecem apenas dados pontuais, além disso algumas barragens, em especial de pequeno porte, não possuem qualquer tipo de instrumentação, o que limita a compreensão das condições hidráulicas e mecânicas do barramento. Uma alternativa crescente aos métodos convencionais é o uso dos métodos geofísicos, estes possibilitam investigações mais completas e não invasivas. Visando verificar a aplicabilidade desses métodos em barragens de terra para uso hídrico, foram realizadas aquisições de Ground Penetrating Radar (GPR) na Barragem Sítios Novos, localizado no município de Caucaia, Ceará. O levantamento geofísico foi realizado em duas campanhas, a primeira ocorreu em janeiro de 2023, na qual o reservatório se encontrava com 70,36% de capacidade, e uma segunda campanha em maio de 2023, onde este registrava cota máxima, possibilitando capturar diferentes cenários de percolação. Por conseguinte, foi realizado o comparativo com dados de medidores de nível d'água e com análises de percolação realiza-

Geotechnical monitoring of dams is currently conducted using conventional methods such as visual inspections and measurements from instruments like water level meters, piezometers, and surface markers. However, these provide only point-specific data. Additionally, some dams, especially smaller ones, lack any instrumentation, limiting the understanding of the hydraulic and mechanical conditions of the structure. An emerging alternative to conventional methods is the use of geophysical methods, which enable more comprehensive and non-invasive investigations. To verify the applicability of these methods in earth dams for water use, Ground Penetrating Radar (GPR) surveys were conducted at the Sítios Novos Dam, located in the municipality of Caucaia, Ceará. The geophysical survey was conducted in two campaigns: the first took place in January 2023, when the reservoir was at 70.36% capacity, and the second in May 2023, when it was at full capacity, allowing for the capture of different percolation scenarios. Subsequently, a comparison was made with water level meter data and percolation analyses conducted through geotechnical modeling, which allowed for a better understanding of the dam's structure and hydraulic behavior.

das por modelagem geotécnica, que permitiram uma melhor compreensão da estrutura da barragem e o seu comportamento hidráulico. Através do Ground Penetrating Radar e análises comparativas foi possível identificar diferentes materiais constituintes da barragem, bem como estruturas internas. Ademais, foi feito o monitoramento da evolução do nível d'água e detecção de potencial zona anômala. Os resultados obtidos indicam a eficiência e aplicabilidade do GPR como metodologia auxiliar no monitoramento de barragens.

Palavras-chave: Barragem; GPR; Modelagem geotécnica; Instrumentações.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade (construção de cidades, geração de energia, agricultura, lazer, entre outros) sempre esteve ligado à disponibilidade hídrica das diversas regiões do mundo. Neste aspecto, a construção de barragens tem papel fundamental para assegurar a oferta de água contínua necessária para a manutenção das cidades e das populações.

No Brasil, o crescente número de barragens distribuídas por todo o território trouxe também uma crescente preocupação sobre a segurança destas estruturas, tendo em vista o envelhecimento de muitas barragens construídas, a crescente dependência da sociedade dos benefícios proporcionados por elas, e a necessidade de minimizar riscos e evitar efeitos catastróficos (Canali, 2002; Menescal, 2009). A possibilidade de ruptura desses empreendimentos acarreta consequências para a sociedade, tendo em vista que podem ocorrer perdas de vidas humanas, além de impactos econômicos, sociais e ambientais. No Estado do Ceará, destaca-se os eventos ocorridos durante a quadra chuvosa de 2022 como a Barragem de Caraíbas (Várzea Alegre) e a Barragem do Catolé (Cedro) ocorridas no início de 2022, bem como as ocorridas em 2023, são exemplos a Barragem do Açude Retiro em Maranguape e a barragem do açude Romão, na zona rural de Farias Brito. (Freitas, 2022; Cesário, 2023; Sampaio & Freitas, 2023).

Conforme descrito por Menescal (2009), a experiência mundial sobre infraestruturas de barragens tem mostrado que os custos necessários à

Through Ground Penetrating Radar and comparative analyses, it was possible to identify different materials constituting the dam, as well as internal structures. Additionally, monitoring of the water level evolution and detection of potential anomalous zones was performed. The results obtained indicate the efficiency and applicability of GPR as an auxiliary methodology in dam monitoring.

Keywords: Dam; GPR; Geotechnical modeling; Instrumentations.

garantia da segurança de uma barragem são pequenos, se comparados com aqueles que se seguem em caso de ruptura. Ressalta-se ainda que as barragens são estruturas com significativo valor econômico, e no caso de barragens para fins de abastecimento de cidades, em geral, são construídas com recursos públicos. A segurança de barragens visa garantir a estabilidade das estruturas e reduzir ao máximo as possibilidades de acidentes (BRASIL, 2020). A segurança é garantida através de revisões periódicas compreendendo a análise das características hidráulicas, hidrológicas, de estabilidade estrutural e a adequabilidade operacional das diversas instalações, de acordo com critérios de projeto e informações disponíveis quando da realização de cada revisão. Usualmente, as barragens são monitoradas através de inspeções visuais e instrumentos como: marcos superficiais, inclinômetros, medidores de nível d'água, piezômetros, medidores de deformação, célula de pressão total, medidores de vazão e estações meteorológicas (Machado, 2007; Cruz, 2014; Silveira, 2016). Apesar desses métodos diretos serem tradicionais e eficientes, oferecem apenas dados pontuais sobre a barragem.

Os métodos geofísicos surgem como uma metodologia complementar para o monitoramento e inspeção das barragens, uma vez que geram imagens contínuas de subsuperfície, possibilitando a identificação de possíveis irregularidades na estrutura da barragem. Esses métodos possuem grande potencial para detectar processos de erosão interna e infiltrações anormais em estágios iniciais de desenvolvimento (Sjödahl et al. 2008, Be-

drosian et al. 2012). Tal técnica de monitoramento é não-destrutiva, o que é particularmente importante quando se trabalha com barragens, onde a perfuração e outras investigações penetrantes são normalmente evitadas (Sjödahl et al., 2008). Além dos métodos geoeletricos, existem ainda métodos sísmicos e o radar de penetração no solo (Ground Penetrating Radar), que também têm sido usados em investigações de barragens (Mailani, 2006; Kim et al., 2007). Medições de resistividade elétrica têm sido usadas em várias ocasiões para investigações de locais de barragens (Aina et al. 1996, Batayneh et al. 2001) e controle da segurança de barragens (por exemplo, Van Tuyen et al. 2000; Buselli e Lu, 2001; Panthulu et al. 2001; Voronkov et al. 2004; Cho & Yeom, 2007).

Os métodos geofísicos têm forte potencial para atuar auxiliando a instrumentação convencional, podendo, no caso de inexistência ou falha geral desta, fornecer informações mais completas e relevantes que a inspeção visual (Teixeira, 2013). Por isto, este trabalho apresenta uma aplicação de Ground Penetrating Radar na caracterização geológico-geotécnica da Barragem Sítios Novos, localizada no município de Caucaia, Ceará, Nordeste do Brasil. O levantamento mapeou camadas subsuperficiais e examinou o comportamento hídrico no interior do maciço, auxiliado por análises de percolação em softwares geotécnicos e por medidas de instrumentações (medidores de nível d'água).

2. OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicabilidade do método geofísico Ground Penetrating Radar como uma ferramenta auxiliar no monitoramento de barragens de terra. Através da interpretação dos levantamentos de Ground Penetrating Radar, o trabalho visou contribuir para a segurança e a gestão das barragens, oferecendo uma análise detalhada das condições internas e potenciais riscos associados à estrutura.

3. METODOLOGIA

O trabalho iniciou-se com o levantamento do acervo bibliográfico acerca da Barragem Sítios Novos e dos métodos de estudo (Ground Penetra-

ting Radar e modelagem geotécnica). Através das informações levantadas para caracterização do reservatório em análise, especialmente da Base Documental da Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH, 1997a, 1997b, 1997c, 1999), foi possível planejar as aquisições geofísicas e levantar a geometria e os parâmetros geotécnicos para a modelagem de fluxo.

A Barragem Sítios Novos está localizada na região metropolitana de Fortaleza, mais especificamente no distrito de Sítios Novos, na porção oeste do município de Caucaia. A geologia da região é composta em 80% por rochas cristalinas do Pré-Cambriano, pertencentes ao Complexo Gnaiss Migmatítico (PEgn), e por coberturas sedimentares do Terciário-Quaternário, representadas pela Formação Barreiras (Tqb). Em relação às ocorrências minerais na área do empreendimento, constata-se a presença de calcário e diatomito, geralmente associados ao leito dos corpos d'água da região (Demes, 2013). A área também inclui sedimentos inconsolidados da cobertura aluvionar do Rio São Gonçalo, que foram utilizados na construção da barragem, concluída em 1999, com o objetivo de abastecer o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) e as comunidades locais. A barragem é composta por um barramento principal de terra do tipo zoneada, uma barragem auxiliar de terra do tipo homogênea, uma tomada d'água do tipo galeria e um vertedouro, além de conter um sistema adutor, que constitui o Canal do Pecém.

Os dados de Ground Penetrating Radar foram adquiridos em duas campanhas de trabalho de campo, realizadas em diferentes condições de nível de água na barragem: a primeira em 13 de janeiro de 2023 e a segunda em 25 de maio de 2023. Nos mesmos dias das aquisições geofísicas, foram coletadas as leituras das instrumentações. O banco de dados de instrumentação, complementado e cedido pelo corpo técnico da COGERH, permitiu verificar a evolução temporal das leituras. Além da aquisição dos dados geofísicos e das leituras dos piezômetros e medidores de nível de água, foi realizada a modelagem geotécnica de fluxo interno da barragem por meio do software Slide, em seções transversais aos perfis de Ground Penetrating Radar e paralelas às instrumentações, com o objetivo de realizar comparações entre todos os dados (Figura 1).

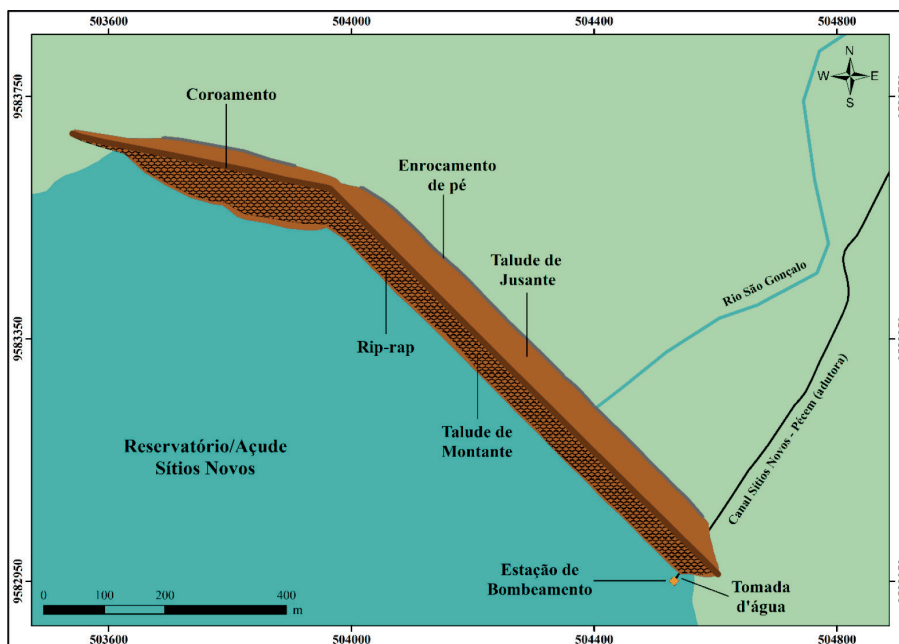


Figura 1 - Elementos da Barragem Sítios Novos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados das instrumentações são coletados pelo AGIR (Agente de Guarda e Inspeção do Reservatório). Posteriormente os dados são enviados para a Gerência Regional que insere a informação no SIGERH (Sistema Integrado de Gestão dos Recursos Hídricos). A barragem possui ao todo, 12 medidores de nível d'água e 9 piezômetros, estes

são dispostos ao longo de 3 seções instrumentadas, denominadas conforme a estaca em que estão inseridas, tem-se então da direita para esquerda (visão de montante) a Seção 55; Seção 62; e Seção 69, estas são subdivididas em 4 pontos, o primeiro localizado entre a crista e o talude montante e os demais ao longo do talude jusante (Figura 2).

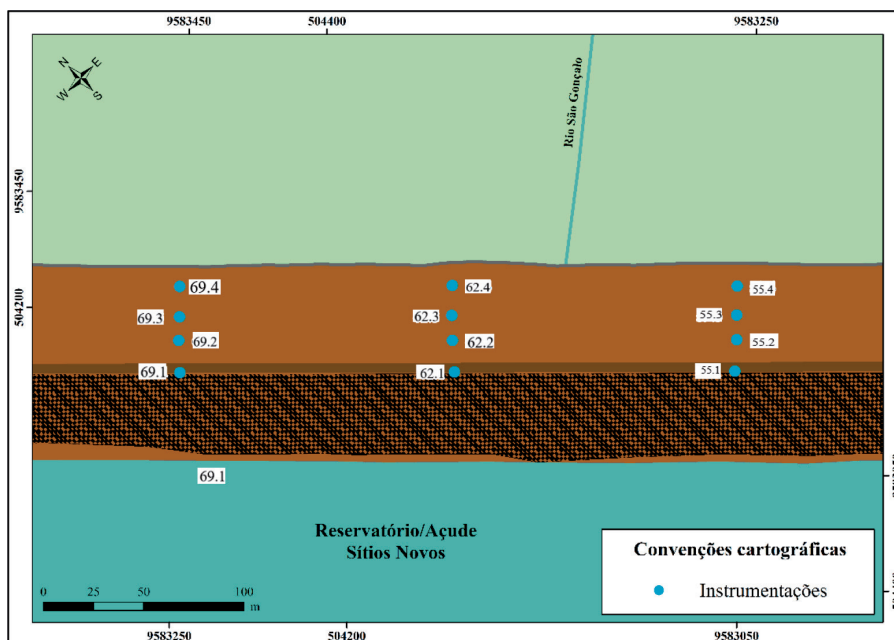


Figura 2 – Distribuição dos instrumentos ao longo das seções 55, 62 e 69.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados são registrados semanalmente, conforme seção e número da instrumentação, sendo medidos a partir do ponto superficial, utilizan-

do um sensor de nível d'água. Os dados coletados nos dias de aquisição de Ground Penetrating Radar (GPR) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Leituras das instrumentações registradas nos dias de aquisição geofísica.

Data de Aquisição	Seção Instrumentada					
	Seção 55	Leitura (m)	Seção 62	Leitura (m)	Seção 69	Leitura (m)
13 de Janeiro	NA.55.1	11,63	NA.62.1	13,44	NA.69.1	11
	NA.55.2	Seco	NA.62.2	Seco	NA.69.2	Seco
	PZ.55.2	Seco	PZ.62.2	Seco	PZ. 69.2	13,96
	NA.55.3	Seco	NA.62.3	Seco	NA. 69.3	Seco
	PZ.55.3	10,05	PZ.62.3	Seco	PZ. 69.3	8,44
	NA.55.4	Seco	NA.62.4	Seco	NA. 69.4	Seco
	PZ.55.4	5,99	PZ.62.4	6,09	PZ. 69.4	4,05
25 de Maio	NA.55.1	11,6	NA.62.1	12,3	NA. 69.1	10,05
	NA.55.2	Seco	NA.62.2	Seco	NA. 69.2	Seco
	PZ.55.2	14,03	PZ.62.2	13,81	PZ. 69.2	13,83
	NA.55.3	Seco	NA.62.3	Seco	NA. 69.3	Seco
	PZ.55.3	9,37	PZ.62.2	10,44	PZ. 69.3	8,33
	NA.55.4	1,85	NA.62.4	5,66	NA. 69.4	2,67
	PZ.55.4	4,47	PZ.62.4	8,33	PZ. 69.4	3,87

Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1 Modelagem geotécnica

A modelagem geotécnica visa complementar o comparativo entre os níveis d'água inferidos pelo Ground Penetrating Radar e medidos pelas instrumentações, além disto pode-se realizar a análise da percolação da água dentro do maciço, o que auxilia na interpretação dos dados adquiridos. Para realização da modelagem foi utilizado o software de modelagem geotécnica de estabilidade de taludes e percolação denominado Slide da empresa Roscience. O Slide é um software de análise de estabilidade de taludes capaz de correlacionar a análise de estabilidade, com percolação de águas subterrâneas e infiltração. Por meio desse software, é possível avaliar e projetar a estabilidade dos taludes, fluxo, pressões e gradientes,

levando em consideração as características geotécnicas do material de fundação e corpo da estrutura, além da sua geometria. Para a elaboração da análise da barragem principal de Sítio Novos, o software foi alimentado com os dados obtidos através do 'Relatório do Projeto Executivo da Barragem de Sítios Novos' cedido pela COGERH e também disponibilizados publicamente no site da Secretária Estadual de Recursos Hídricos - SRH. Neste relatório, encontra-se diversos dados técnicos acerca do processo de construção da barragem, incluindo os desenhos estruturais de corte da barragem, o que possibilitou a construção do modelo digital da estrutura externa e interna da barragem (Figura 3). Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 2.

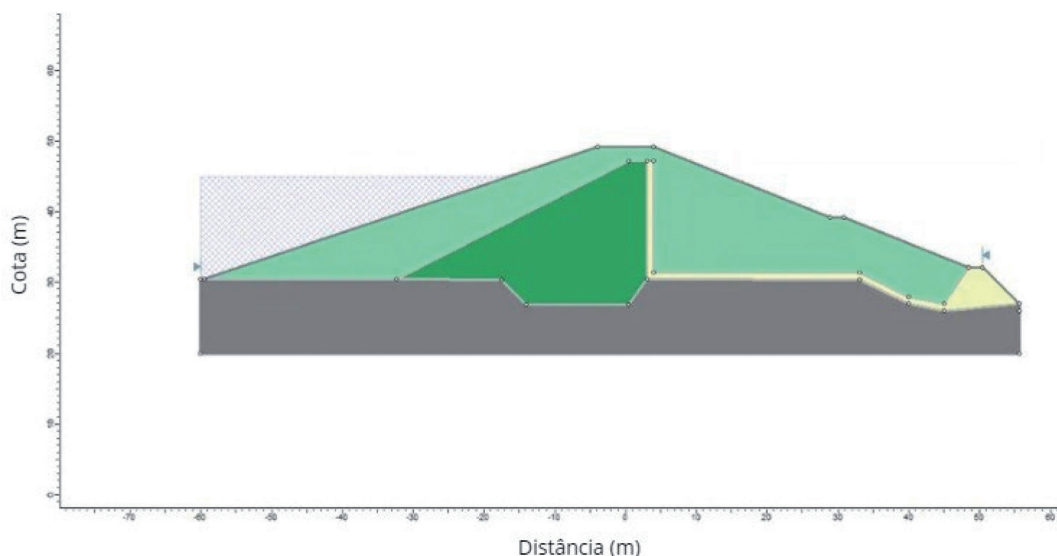


Figura 3 - Estrutura externa e interna da Barragem de Sítios Novos para a seção 60.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados.

Material	Cor	kN/m ³	Tipo de Resistência	Coesão (kPa)	Phi (*)	Phi b (*)	Pressão de entrada de ar
Jazida 1		18,6	Mohr-Coulomb	1	31,8	0	0
Jazida 2		18,8	Mohr-Coulomb	1	36,6	0	0
Areal 1		18	Mohr-Coulomb	1	34,2	0	0
Fundação		20	Mohr-Coulomb	1	35	0	0

Fonte: Elaborado pelos autores.

O modelo foi baseado na Estaca 62, a seção mais alta e com maiores gradientes hidráulicos monitorados da barragem. Usando os desenhos técnicos, foi criado o modelo externo da barragem, respeitando as medidas e a disposição interna dos materiais. Em seguida, foram adicionados os parâmetros geotécnicos, como peso específico, resistência (coesão e ângulo de atrito), e permeabilidade dos materiais. Ensaios geológicos e geotécnicos, como granulometria, limites de liquidez e plasticidade, e sondagens foram realizados para caracterizar os materiais terrosos e rochas usados na construção da barragem.

3.2 Processamento de dados

As etapas de processamento foram realizadas no software RADAN 7.0 da GSSI. No software, fo-

ram desenvolvidas duas rotinas de processamento, uma para os dados adquiridos no modo distância (perfis PL01 e PL02) e outra para os dados adquiridos no modo tempo (perfis PL03, PT01, PT02 e PT03), se distinguindo por uma etapa primária de compilação dos dados e normalização da distância, baseado nos dados topográficos adquiridos em campo.

O perfil PL03, tanto na aquisição em janeiro como na de maio, teve que ser adquirida em mais de um arquivo, devido a sua extensão e irregularidade da superfície do terreno. Iniciando o processamento, foi feito o merge dos arquivos das respectivas seções, utilizando a ferramenta *Append Files*, posteriormente foram ajustadas as escalas horizontais das seções coletadas no modo tempo, utilizando a ferramenta *Distance Normalization*. Após os ajustes, inicia-se o processamento pro-

priamente dito, que se dá pela correção do tempo zero, na qual é feito o correto posicionamento do tempo inicial do registro do perfil, retirando o retardo no sinal provocado por ondas aéreas. Em seguida é utilizado o filtro *Background Removal*, este calcula uma média das amostras (traço), este valor então é subtraído das amostras individuais. Este filtro suprime sinais consistentes e lineares, associados a ruídos de fundo ou de baixa frequência, por outro lado, realça variações horizontais. Outro filtro utilizado para melhorar os dados é o filtro FIR (*Finite Impulse Response*) essa técnica utiliza uma convolução ponderada para realçar ou atenuar componentes específicos da frequência.

Os coeficientes do filtro são convoluídos com os dados de GPR para produzir um sinal filtrado que realça reflexões de interesse e suprime componentes de fundo ou ruído. Antes do ganho, é realizado a deconvolução, que tem por objetivo atenuar reflexões múltiplas, reduzindo o efeito de espalhamento do sinal, restaurando a onda a uma forma semelhante a que tinha antes de sofrer convolução, seja pelo sistema de aquisição ou no próprio processamento. Este filtro aumenta a resolução temporal do sinal. Por fim é realizado o ganho, o filtro *Range Gain*, que modifica a ampli-

tude das reflexões, podendo ser feita a compensação da atenuação natural do sinal. Nos perfis foi utilizado o ganho do tipo linear.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Modelagem Geotécnica de Fluxo – Software Slide

Através da interpretação inicial da modelagem de fluxo interno da barragem, é possível notar que o nível de água apresenta o comportamento esperado para o seu fluxo. O nível de água no talude à montante, pré-filtro, sofre uma queda ao entrar em contato com o filtro da barragem, atingindo uma profundidade de 16 m. A partir do filtro, o nível de água vai seguindo o filtro horizontal, decaindo de forma gradual. Com a interpretação inicial, os piezômetros foram arranjados na posição e profundidade correta, para a seção 62, no modelo no Slide (Figura 4). A partir do ponto mais profundo do equipamento, foram estimados as poropressões nos mesmos locais das instrumentações de campo.

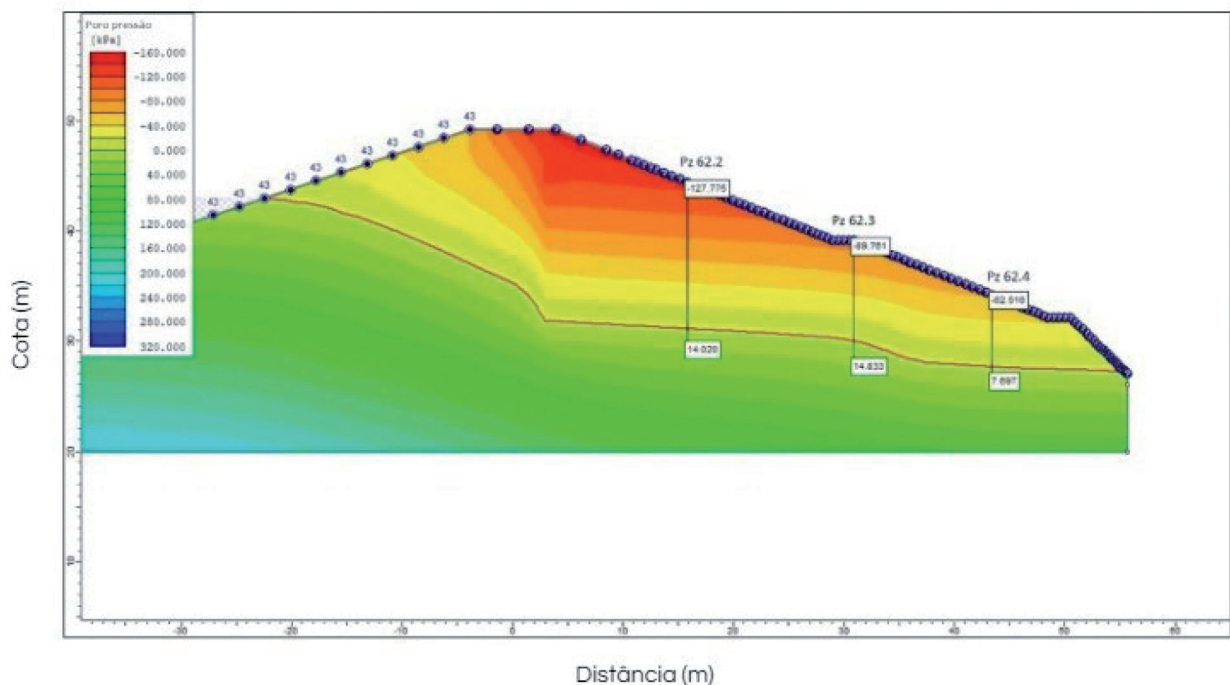


Figura 4 – Distribuição dos piezômetros na seção modelada para janeiro (cota 43).

Fonte: Elaborado pelos autores

A partir disso, foi possível realizar um comparativo dos valores das poropressões da instrumentação e da modelagem (Tabela 3), e das medidas de nível de água (que serão apresentadas com o levantamento geofísico). É possível notar variações (poropressão do piezômetro – poropressão da modelagem) que vão de 1,67 kPa a 17,72 kPa. Os piezômetros Pz 62.3 e PZ 62.4 são os que apre-

sentaram maior divergência dos dados da modelagem, que pode ser explicado pelo fato destes estarem localizados no limite da fundação ou na própria fundação do maciço, respectivamente. Sabe-se que os ensaios “in situ” para caracterizar as propriedades geotécnicas podem apresentar uma maior variabilidade por conta da própria variabilidade geológica do maciço de fundação.

Tabela 3 – Cargas piezométricas e condições de poropressão da seção 62.

Dia da Aquisição	Piezômetro	Carga Piezométrica (m)	Poropressão pela instrumentação (kPa)	Poropressão pela modelagem (kPa)	Diferença (kPa)
13 de Janeiro	PZ 62.2	0	0	14,02	-14,02
	PZ 62.3	0	0	14,83	-14,83
	PZ 62.4	2,59	25,41	7,69	17,42
25 de Maio	PZ 62.2	2,07	20,31	18,64	1,67
	PZ 62.3	0,46	4,51	16,93	-12,42
	PZ 62.4	2,86	28,06	10,91	17,15

Fonte: Elaborado pelos autores.

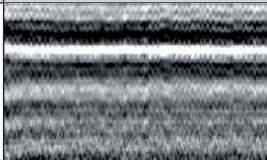
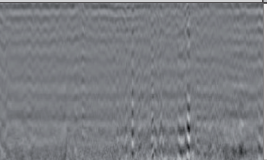
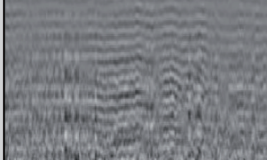

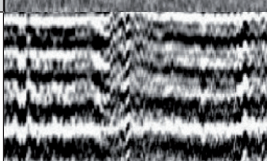
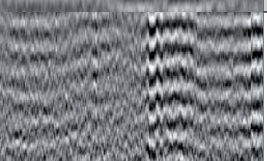
Ressalta-se ainda que, os valores de poropressão dos piezômetros acima do indicado na modelagem geotécnica, podem ser indicativos de redução nos fatores de segurança da estabilidade da barragem. Entretanto, para um melhor diagnóstico da barragem, é preciso ser realizadas retroanálises para quantificar estas reduções.

4.2 Análise dos radargramas

A análise dos perfis bidimensionais de GPR (radargramas) foi realizado de modo qualitativo, com base na diferenciação de padrões de reflexão e na identificação de refletores importantes.

O presente trabalho adotou uma metodologia interpretativa semelhante aos aplicados em estudos estratigráficos-sedimentológicos, devido ao material constituinte e ao caráter estratificado da barragem, visto que se trata de uma barragem zonada, que conta ainda com a presença de filtro e fundação de materiais distintos. A caracterização de padrões de reflexão em estudos estratigráficos-sedimentológicos, auxiliam na definição de fácies sedimentares, elementos deposicionais, e superfícies limitantes, além de eliminarem interpretações alternativas (Paula, 2019). A Figura 5 apresenta uma síntese dos padrões de reflexão interpretadas para Barragem Sítios Novos.

Figura 5 - Padrões de reflexão identificados na Barragem Sítio Novos.

Padrão de reflexão	Radargrama		Descrição	Interpretação
	40 MHz	70 MHz		
Pr1i			Refletores homogêneos, moderadamente contínuos de baixa amplitude.	Relacionado ao material areno argiloso (Jazida 1) não saturado.
Pr2i			Refletores subparalelos de baixa-média amplitude, moderadamente contínuos.	Relacionado ao material areno silto argiloso (Jazida 2) não saturado.
Prc			Refletores caóticos de média amplitude	Relacionado areno argiloso e areno silto argiloso saturado, aluvião e/ou rocha cristalina.

Fonte: Elaborado pelos autores.

As seções possuem de modo geral dois tipos de ruídos que não puderam ser totalmente eliminados na etapa de processamento, o primeiro corresponde a refletores plano-paralelos, que ocorrem na parte superior do perfil, esse ruído é comum em aquisições com antenas de baixa frequência. Já o segundo, diz respeito a ruídos verticalizados ocasionados por mudanças abruptas verticais da superfície de aquisição, este pode ser observado especialmente nos perfis adquiridos no modo tempo.

4.3 PL01 (crista)

O perfil PL-01 foi posicionado na crista da barragem, permitindo a análise das camadas superiores e da fundação (Figura 6). A caracterização dos materiais revelou a presença de uma camada superior de material areno-silto-argiloso, seguida por uma camada de material areno-argiloso, e a fundação composta por aluvião e/ou rochas metamórficas.

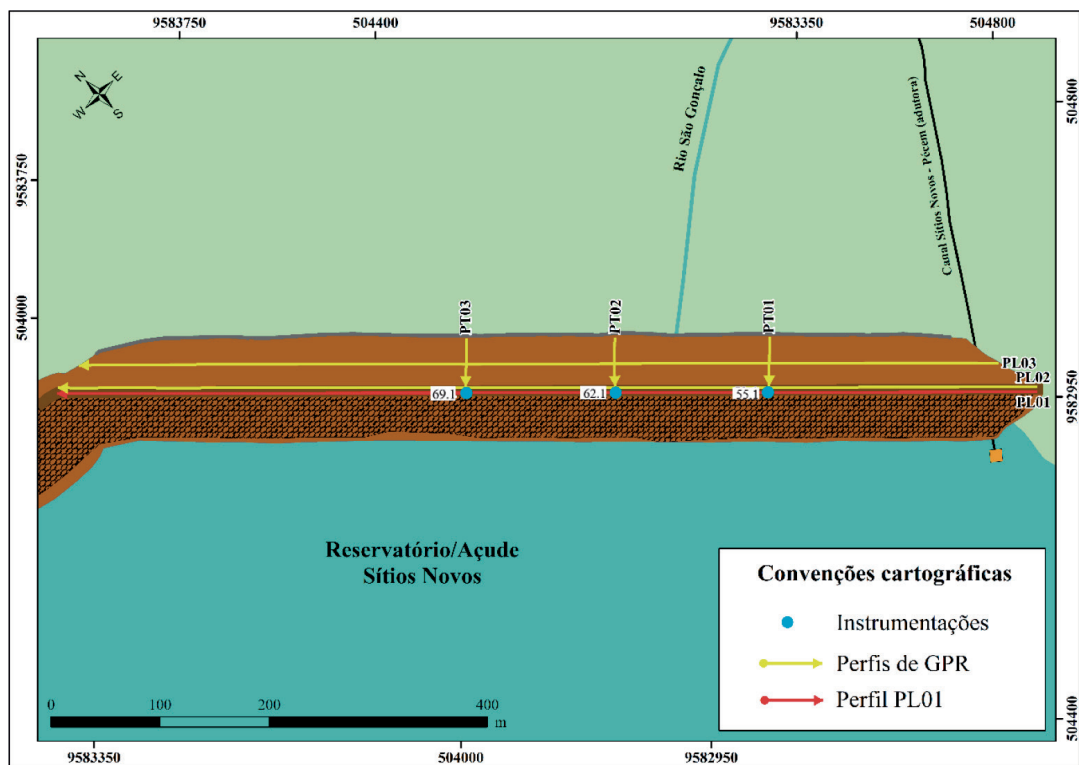


Figura 6 - Posição do perfil PL01.

Fonte: Elaborado pelos autores.

O perfil realizado com a antena de 40 MHz alcançou a profundidade de 45,5 m, enquanto o perfil adquirido com a antena de 70 MHz chegou apenas a 25 m. Analisando as constantes dielétricas, o silte apresenta valor 10, em condição de saturação com água, já a areia, sobre mesma condição, varia de 20 a 30. O valor de constante dielétrica obtido para o perfil PL01, por análise de hipérbole foi de 10. O perfil foi adquirido perpendicular às seções instrumentadas 55, 62 e 69, tendo como instrumento mais próximo o primeiro medidor de nível d'água de cada seção, estes são representados nos perfis interpretados, com suas respectivas medidas. No perfil adquirido em janeiro, foram identificados 3 padrões de reflexão (Figura 7), a primeira é o Pr1i, este compreende a parte mais superficial do perfil e tem uma profundidade variando de 2 a 2,6 m, porém alcança mais constantemente 2,2 m. Nele predomina um padrão de poucas reflexões, relativamente homogêneos e de baixa amplitude, sendo relacionado ao material areno-argiloso seco (Jazida 1).

Em seguida, é observado o padrão Pr2i, a superfície limítrofe deste com o padrão PR1i é

identificada por um refletor contínuo de média amplitude. A Pr2i é caracterizada por refletores subparalelos de média a baixa amplitude, sendo este relacionado ao material areno-silto-argiloso (Jazida 2), tendo a superfície limítrofe inferior mais variada que a PR1i, alcançando uma profundidade média aproximada de 12 m. O padrão Pr1i apresenta heterogeneidade vertical, possuindo diferenças entre a amplitude de sua parte superior e inferior, estas são limitadas por um refletor de média a alta amplitude, que assim como em estudos sedimentológicos, pode ser referente a um hiato construtivo, alterações do material, diferenças de compactação ou maior saturação. O segmento final do perfil é identificado por um padrão fortemente caótico de média amplitude, o PrC é relacionado a rocha cristalina, aluvião e especificamente nesse perfil, sua porção superior pode estar relacionada a zona de material areno-silto-argiloso saturado, não sendo possível fazer a distinção do material pelo perfil de GPR. Este padrão se estende até o final do perfil e apresenta uma espessura média aproximada de 33 m.

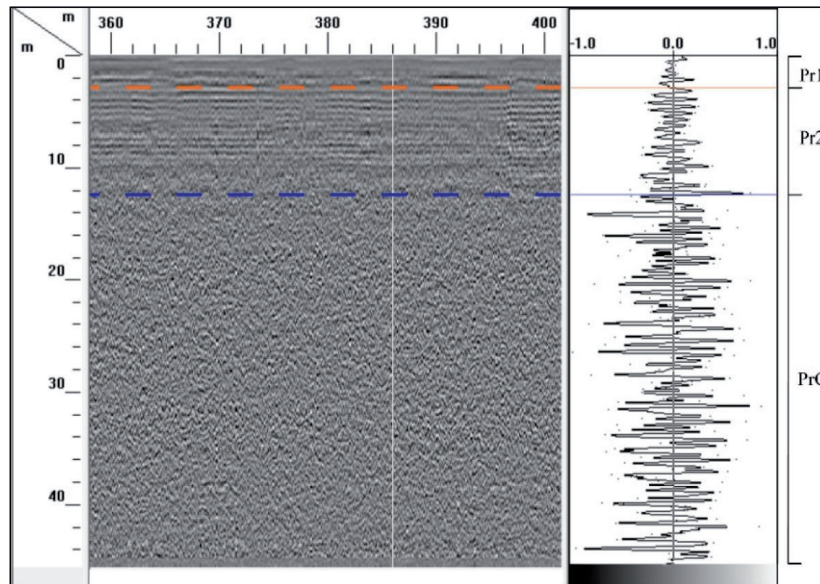


Figura 7 - Interpretação do padrão de reflexão do PL01-jan. (A) Radargrama processado; (B) Traço da posição 386 m (amplitude x tempo).

Fonte: Elaborado pelos autores.

O perfil adquirido em maio apresenta muitos ruídos plano-paralelos, dificultando sua interpretação, mas foram identificados três padrões de reflexão, conforme Figura 8. No segmento mais superficial tem-se o PR1i (profundidade média de 2 m), possui poucas reflexões e duas superfícies refletoras subparalelas de alta amplitude, provavelmente de ondas diretas, relacionado ao material areno-argiloso seco. Entre 2 e 10 m de profundidade, referente ao padrão Pr2i que apresenta

refletores de média amplitude, subparalelos e moderadamente contínuos, relacionados ao material areno-silto-argiloso. Existe uma heterogeneidade vertical, com refletores de média-baixa amplitude entre 2 e 3,3 m, e a porção inferior (até 10 m) é mais afetada por ruídos plano-paralelos. Após 10 m de profundidade, aumenta gradativamente os refletores caóticos o PrC. A porção superior ainda preserva alguns refletores subparalelos, enquanto a inferior é dominada por refletores caóticos.

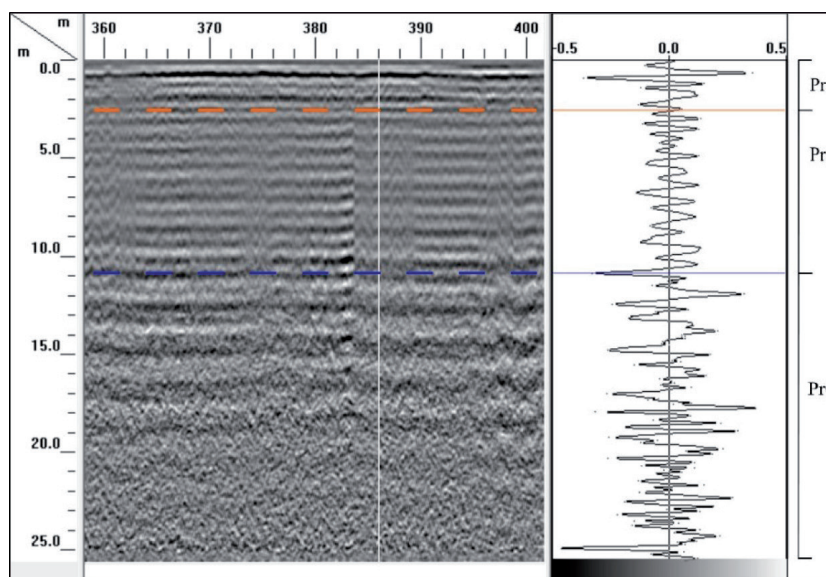


Figura 8 - Interpretação do padrão de reflexão do PL01-mai. (A) Radargrama processado; (B) Traço da posição 386 m (amplitude x tempo).

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os refletores caóticos da PrC ocorrem devido à dissipação da onda eletromagnética causada por um maior grau de saturação, que provoca atenuação na porção final. Esse padrão pode estar relacionado a rochas cristalinas ou ao enfraquecimento do sinal de GPR. A Figura 9 sintetiza o comparativo entre os valores do medidor de nível d'água (MNA), modelagem geotécnica (MG) e o GPR. Os dados adquiridos pela geofísica apresentaram-se

de modo geral, compatíveis com o esperado, tanto em comparação a medida da instrumentação e da modelagem geotécnica, bem como no comparativo temporal dos dados (janeiro e maio), onde esperava-se uma elevação do nível de água, apresentando variação entre 10,57% (NA.55.1) a 9,7% (NA.69.1) demonstrando desta forma uma boa uniformidade na evolução do nível d'água.

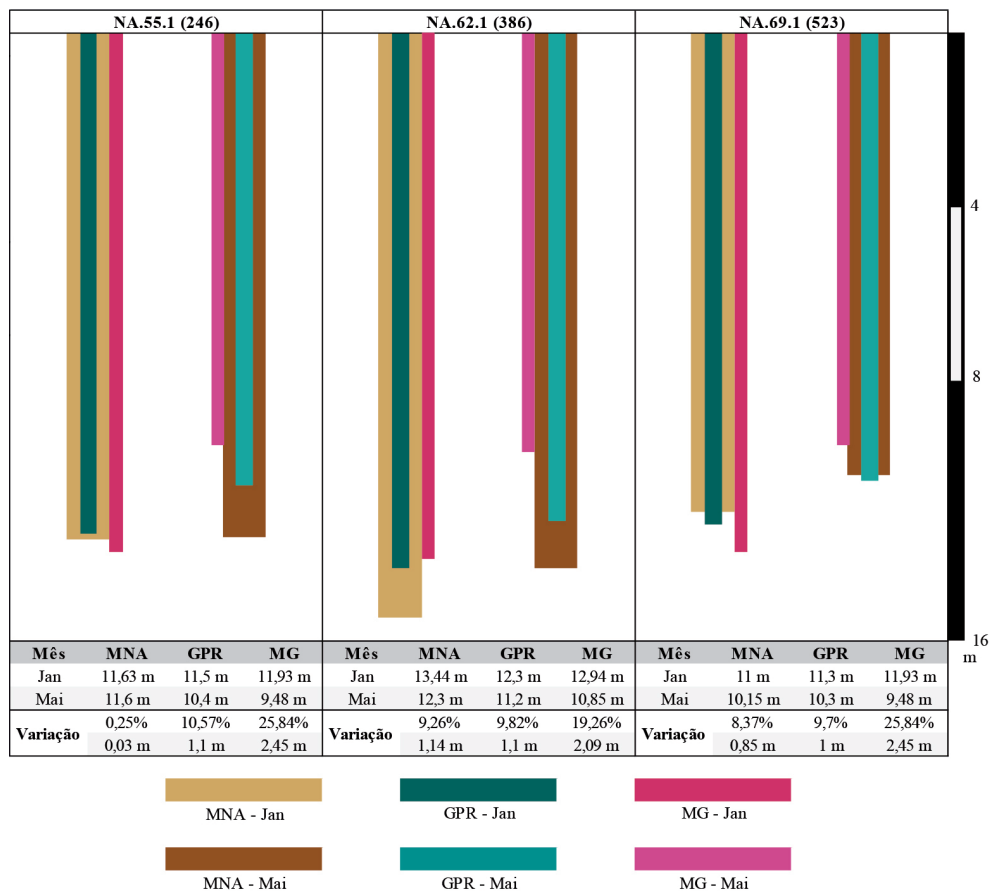


Figura 9 - Comparativo entre o nível d'água medido pela instrumentação, modelagem geotécnica e o inferido a partir do GPR, adquiridos na crista da barragem.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.4 PL02 (berma)

O perfil PL02, está posicionado acima da berma da barragem, do lado direito da canaleta de drenagem, tendo direção sudoeste para noroeste. Conforme observado na Figura 10 o perfil foi realizado sobre uma porção da barragem constituída predominantemente por material areno-argiloso (Jazida 01), tendo na porção inferior uma camada

de areia (filtro) e sotoposto a esse, a fundação formada por aluvião e/ou rochas metamórficas. O perfil realizado com a antena de 40 MHz alcançou a profundidade de 20,6 m, enquanto o perfil adquirido com a antena de 70 MHz chegou apenas a 11,7 m. Analisando as constantes dielétricas, a argila apresenta valor 40, em condição de saturação com água, já a areia, sobre mesma condição, varia de 20 a 30. O valor de constante dielétrica

obtido para o perfil PL02, por análise de hipérbole foi de 46. O perfil foi adquirido perpendicular às seções instrumentadas 55, 62 e 69, tendo como instrumento mais próximo o terceiro medidor de

nível d'água de cada seção, estes são representados nos perfis interpretados, com suas respectivas medidas.

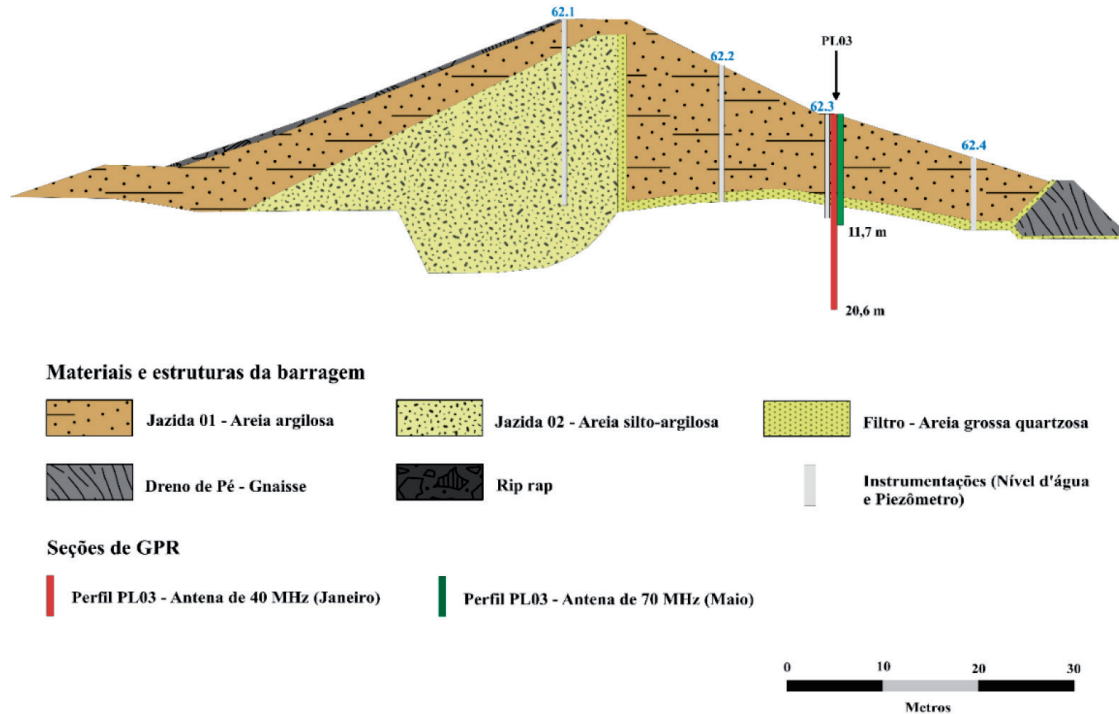


Figura 10 - Seção 62 da barragem, com a posição dos perfis PL03 e instrumentações.

Fonte: Elaborado pelos autores.

No perfil adquirido em janeiro, pode ser identificado 2 padrões de reflexão (Figura 11), o primeiro é o Pr1i, este compreende a parte mais superficial do perfil. Neste padrão, tem-se refletores relativamente homogêneos e de baixa amplitude, com predomínio de poucas reflexões, sendo bastante afetado por ruídos plano-paralelos. Este segmento pode ser relacionado ao material areno-argiloso não-saturado. O segmento inferior do Pr1i possui um aumento de refletores caóticos e

subparalelos, podendo ser relacionada a zona de transição, na qual ocorre saturação por capilaridade. O limite inferior é identificado por um refletor contínuo de alta amplitude, relacionado ao nível d'água. O restante do perfil é caracterizado com o padrão PrC, dado por refletores caóticos, este inicia-se em aproximadamente 8 m e se estende a até a profundidade máxima do perfil, o comportamento uniforme dos refletores não possibilita fazer distinção entre os materiais.

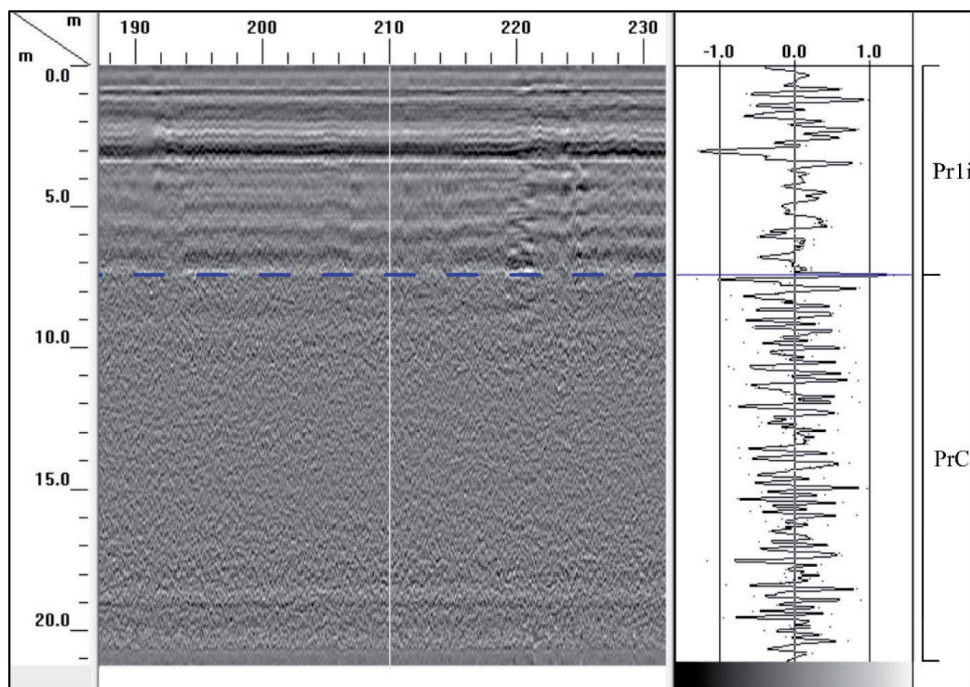


Figura 11 - Interpretação dos padrões de reflexão. (A) Radargrama processado; (B) Traço da posição 210 m (amplitude x tempo).

Fonte: Elaborado pelos autores.

No perfil adquirido em maio, também foram identificados 2 padrões de reflexão (Figura 12). Na porção mais superficial tem-se o Pr1i, caracterizado por poucas reflexões, este comportamento pode ser oriundo da atenuação do sinal dado pelo material argiloso, que possui maior condutividade e dissipa a onda eletromagnética. Assim como no perfil adquirido em janeiro, este apresenta uma zona de saturação por capilaridade, identificada pelo aumento de refletores caóticos. Neste perfil tal zona pode ser melhor delimitada do que no perfil adquirido no início do ano, isso se deve a resolução da antena utilizada (70 MHz). O segmento final do perfil predomina os refletores caóticos referentes ao padrão PrC, relacionado a uma porção do material arenoso saturado, aluvião e/ou rochas metamórficas constituintes da fundação. O contato entre os padrões Pr1i e PrC se dá por um refletor contínuo de alta amplitude, interpretado como o nível d'água. Este perfil obteve os melhores refletores relacionados ao NA, isto se deu devido ao material de maior granulometria

(areia) e ao seu nível de saturação, possivelmente alto, visto que se trata do filtro, além da melhor resolução da antena de 70 MHz, em relação a antena de 40 MHz.

Para os recortes do perfil PL02 com extensão de 100 m tendo como dispositivo central um medidor de nível d'água, as leituras dos medidores de nível da instrumentação 55,3, 62,3 e 69,3, apresentaram em janeiro, bem como em maio, valores zerados, ou seja, não foi detectado o nível d'água. Tais medidas são consideradas normais, pois segundos os projetos construtivos, a base dos medidores está localizada na fundação. A Figura 13 apresenta o recorte do perfil entre a posição 160 e 260 m, tendo na sua parte central (posição 210 m) a instrumentação 55,3, em janeiro o nível d'água inferido pelo GPR foi de 7,6 m, enquanto que o obtido em maio foi de 5,7 m. A modelagem obteve para janeiro a profundidade de 7,8 m, já para maio teve-se 7,25 m.

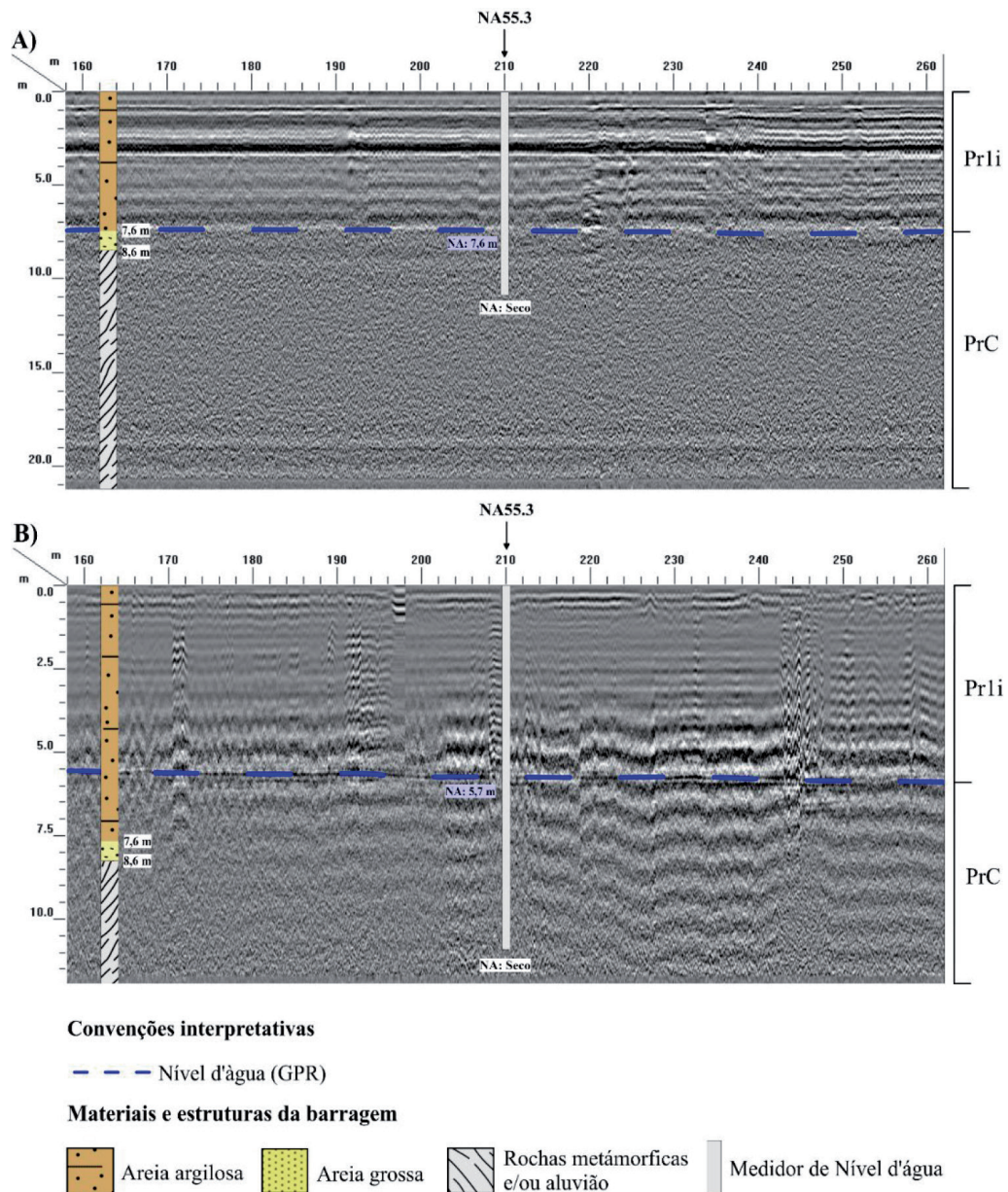


Figura 12 - Perfil PL03, entre a posição 160 e 260 m. A) Radargrama adquirido em janeiro, com a antena de 40 MHz; B) Radargrama adquirido em maio, com a antena de 70 MHz.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 13 sintetiza o comparativo entre os valores do nível d'água inferidos pelo GPR e os obtidos na modelagem geotécnica. Os dados apresentaram-se de modo geral dentro do esperado, embora não seja possível estabelecer um paralelo com as medições das instrumentações, pois apresentaram leituras zeradas (valores possíveis, visto que estão localizadas na fundação). No compara-

tivo temporal, as medições do GPR acompanharam a evolução do nível d'água, ou seja, indicam elevação da linha freática. O que se mostrou inesperado, pois o nível d'água está mensurado acima do filtro, o que indica uma possível anormalidade na percolação da água. Essa condição é corroborada pelas leituras da instrumentação 62,4, as quais também indicam o nível d'água acima do filtro.

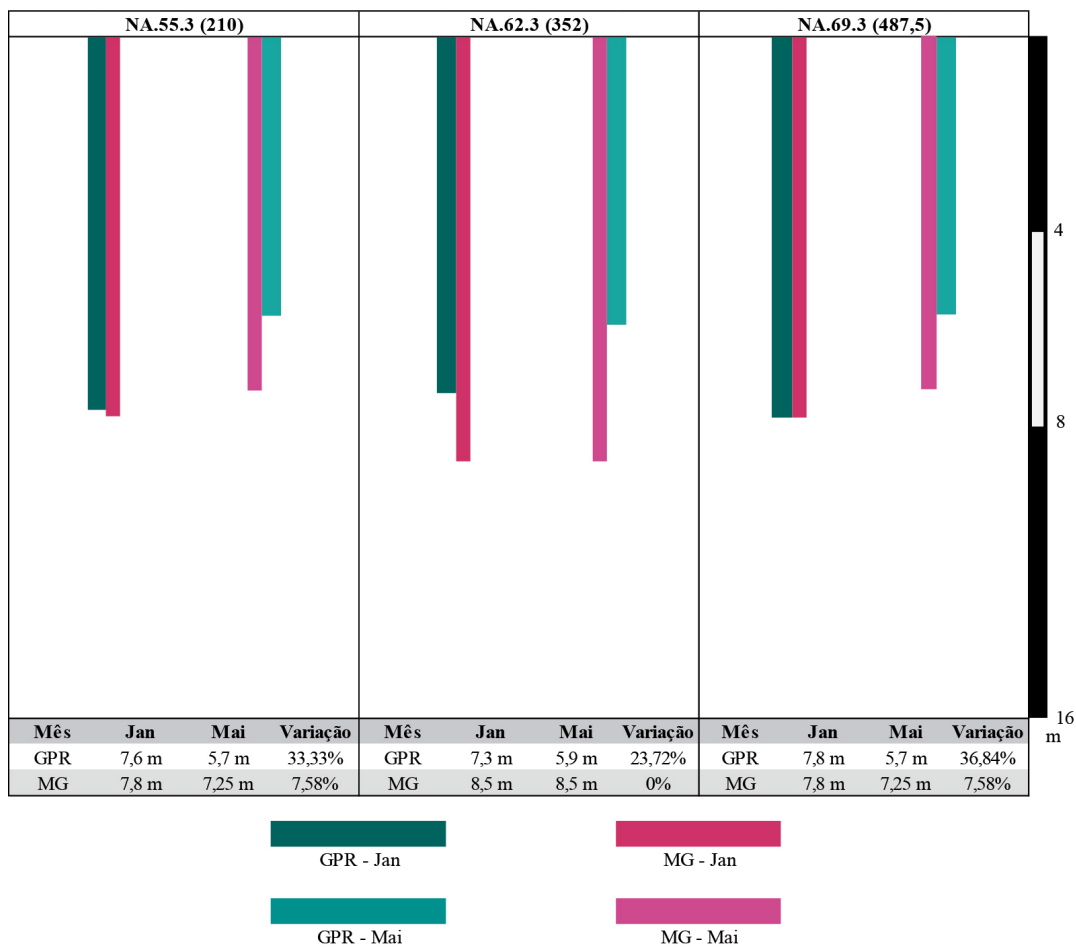


Figura 13 - Comparativo entre o nível d’água inferido pelo GPR e pela modelagem geotécnica, adquiridos na berma da barragem.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.4 Comparativo Geral dos Resultados

A análise comparativa possibilitou uma abordagem mais completa e precisa do monitoramento, podendo ser mensurado a acurácia das feições interpretadas a partir GPR, utilizando mé-

todos mais convencionais (instrumentação e modelagem). A Figura 14 apresenta uma síntese dos níveis d’água inferidos pelo GPR, e obtidos pelas instrumentações e modelagem geotécnica, podendo ser observado o contexto geral da percolação interna da água e coerência dos dados geofísicos.

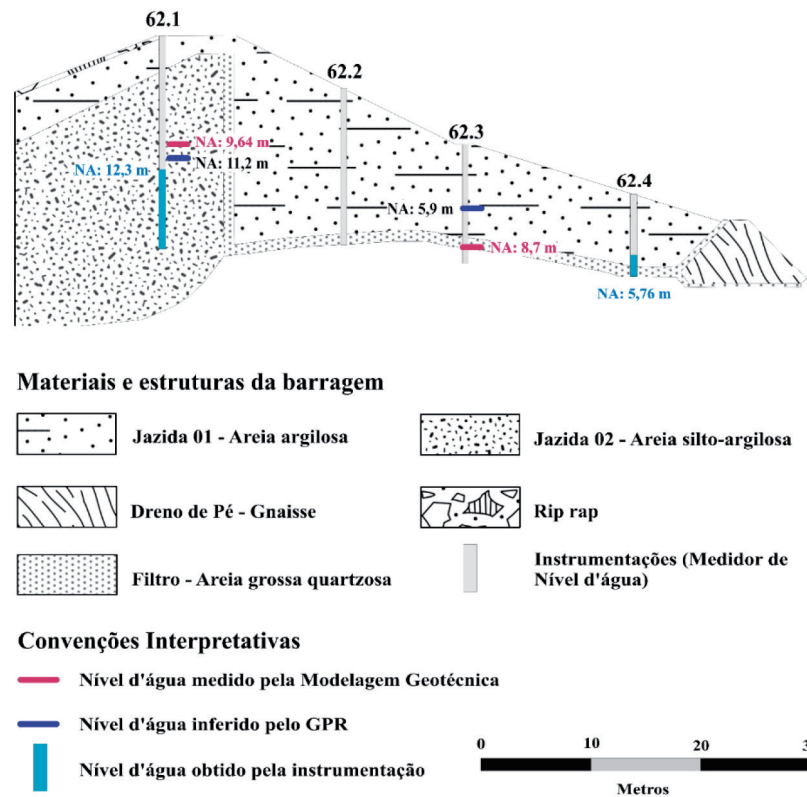


Figura 14 - Síntese dos níveis d'água obtidos e interpretados referentes a aquisição de maio, representados na seção 62.

Fonte: Elaborado pelos autores.

CONCLUSÕES

Os resultados e comparativos dos dados demonstram uma exitosa aplicabilidade do Ground Penetrating Radar, possibilitando a caracterização dos materiais e elementos das barragens, determinação do nível d'água e identificação de zona anômala. A interpretação dos levantamentos de GPR possibilitou diferenciar padrões de reflexão para cada zona da barragem. O padrão de refletores subparalelos está relacionado ao material areno-silto-argiloso, enquanto o padrão de poucas reflexões está associado ao material areno-argiloso. Esses padrões interpretados foram comparados com a geometria indicada no projeto construtivo, apresentando consonância, apesar de possíveis imprecisões topográficas e déficits no projeto. Ademais, também foi identificada a tomada d'água, representada por um grande refletor hiperbólico.

A determinação do nível d'água pelo GPR apresentou resultados coerentes com as medidas

diretas de campo, podendo ser distinguida em todos os perfis apresentados, caracterizada por refletores contínuos de alta amplitude ou zonas com domínio de refletores caóticos. Em alguns perfis, foram identificadas zonas de transição, onde a saturação ocorre por capilaridade. Foi identificada uma possível zona anômala no perfil PL03-mai, onde o nível d'água estava 2,8 m acima do medido pela modelagem geotécnica e 1,8 m do topo do filtro indicado no desenho construtivo. A zona anômala foi corroborada por medidas de instrumentação, indicando a necessidade de integrar esses dados com outros métodos, como eletrorresistividade ou medidas diretas de sondagem, para melhor determinação.

Avaliou-se também as limitações do método, como a dificuldade em superfícies irregulares ou muito inclinadas, além da atenuação do sinal em áreas saturadas e argilosas. Vale destacar também uma característica intrínseca ao método, a relação resolução e profundidade, visto que para se

chegar a maiores profundidades são utilizadas antenas de frequência menor, porém estas apresentam menor resolução vertical, o que pode ser um entrave em estudos de barragens de grande porte. O GPR possui uma promissora aplicação como método auxiliar na caracterização e inspeção de barragens, com destaque para barragens de terra de pequeno e médio porte, dado grande número de barragens deste tipo que não possuem instrumentações.

REFERÊNCIAS

- Aina A., Olurunfemi M.O., Ojo J.S. 1996. An integration of aeromagnetic and electrical resistivity methods in dam site investigation. *Geophysics* 61, 349–356.
- Batayneh A.T., Abdallah S.A.Z., Abdelruhman A.A. 2001. Geophysical investigations for the location of a proposed dam in Al Bishriyya (Al Aritayn) area, northeast Badia of Jordan. *Environmental Geology* 40, p. 918–922.
- Bedrosian P.A., Burton B.L., Powers M.H., Minsley B.J., Phillips J.D. 2012. Creek Dam, Truckee, California. *Journal of Applied Geophysics*, 77, p.7–20.
- BRASIL. Lei 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera dispositivos da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, da Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm. Acessado em 20 jan 2023.
- Buselli G. & Lu, K. 2001. Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods. *Journal of Applied Geophysics* 48:11–23.
- Canali G. V. 2002. Reflexões para a institucionalização de um sistema nacional de segurança de barragens. Notas trocadas com a equipe da Agência Nacional de Águas. Brasília.
- Cesário L. Barragem rompe e destrói estrada carroçável em Maranguape após fortes chuvas. O Povo. Fortaleza, 12 de abril de 2023. Disponível em: <https://www.opovo.com.br/noticias/ceara/maranguape/2023/04/12/barragem-rompe-e-destroi-estrada-carrocal-em-maranguape-apos-fortes-chuvas.html>. Acessado em 17 abr 2023.
- Cho I. K., Yeom J. Y. 2007. Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam. *Geophysics* 72, p. 31–38.
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. 1997a. Projeto Executivo da Barragem Sítios Novos. Relatório Geral, Tomo I – Descrição Geral do Projeto. Fortaleza, Ceará: Secretaria dos Recursos Hídricos – SRH, 29 p.
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. 1997b. Projeto Executivo da Barragem Sítios Novos. Relatório Geral, Tomo IV-1 – Desenhos. Fortaleza, Ceará: Secretaria dos Recursos Hídricos – SRH, 24 p.
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. 1997c. Projeto Executivo da Barragem Sítios Novos. Relatório dos Estudos Básicos, Tomo II – Estudos Geológicos e Geotécnicos. Fortaleza, Ceará: Secretaria dos Recursos Hídricos – SRH, 45 p.
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. 1999. As Built – Barragem Sítios Novos. Vol. I - Relatório de Execução. Fortaleza, Ceará: Secretaria dos Recursos Hídricos – SRH, 90 p.
- Cruz P.T. 2014. 100 Barragens Brasileiras. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 647 p.
- Demes F.O.C. 2013. Acompanhamento da implantação das medidas mitigadoras propostas para a recuperação das áreas degradadas na execução dos açudes públicos Aracoiaba e Sítios Novos, no Estado do Ceará. Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 93 p.
- Freitas C. Barragens que romperam em Várzea Alegre e Cedro, no Ceará, não estavam cadas-

- tradas em sistema do governo. G1 CE. Fortaleza, 17 de março de 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2022/03/17/barragens-que-romperam-em-varzea-alegre-e-cedro-no-ceara-nao-estavam-cadastradas-em-sistema-do-governo.ghtml>>. Acessado em 19 mar 2023.
- Kim J., Yi M., Song Y., Seol S. J., Kim K. 2007. Application of geophysical methods to the safety analysis of an earth dam. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics - JEEG*, vol 12, n° 2, p. 221-235.
- Machado W. G. F. 2007. Monitoramento de barragens de contenção de rejeito da mineração. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São Paulo, 134 p.
- Mailani G. 2006. Monitoring of Tailing Dams with Geophysical Methods. Tese de Licenciatura, Department of Chemical Engineering and Geosciences, Luleå University of Technology, 84 p.
- Menescal R. A. A. 2009. Gestão da segurança de barragens no Brasil - proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, 221 p.
- Panthulu T.V., Krishnaiah, C., Shirke, J.M., 2001. Detection of seepage paths in earthdams using self-potential and electrical resistivity methods. *Engineering Geology*. 59, p. 281-295.
- Paula M. C. L. 2019. Estudo de radarfácies em plácemes auríferos na Baixada Cuiabana. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 82 p.
- Sampaio I., Freitas E. Barragem de açude rompe e água invade casas e comércios em Farias Brito, no interior do Ceará. G1 CE. Fortaleza, 09 de abril de 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/ce/ceara/cariri/noticia/2023/04/09/barragem-de-acude-rompe-e-agua-invade-casas-e-comercios-em-farias-brito-no-interior-do-ceara.ghtml>. Acessado em 17 abr 2023.
- Silveira J. F. A. 2016. Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 416p.
- Sjödahl P., Dahlin, T., Johansson, S., & Loke, M. H. 2008. Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam. *Journal of Applied Geophysics*, 65(3-4), p. 155-164.
- Teixeira W. L. 2013. Um Estudo das Condições de Percolação e Estabilidade em Barragens de Terra mediante Métodos Geofísicos: Caso do Dique de Sant Llorenç de Montgai - Espanha. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 159 p.
- VanTuyenD., Canh T., Weller A. 2000. Geophysical investigations of river dikes in Vietnam. *Eur. J. Environ. Eng. Geophys.* 4. p.195-206.
- Voronkov O.K., Kagan, A.A., Krivonogova N. F., Glagovsky V. B., Prokopovich V. S. 2004. Geophysical methods and identification of embankment dam parameters. *Procs.2nd International Conference on Site Characterization (ISC)*, Porto-Portugal p. 593-599.

ANÁLISE DO DESLIZAMENTO TRANSLACIONAL DE 2022 NA ENSEADA DA PRAIA DE ITAGUAÇU EM ILHA GRANDE- RJ

ANALYSIS OF THE 2022 TRANSITIONAL SLIDE AT ITAGUAÇU BAY IN ILHA GRANDE, RJ

CAROLINA MARTINS LATGÉ KWAMME

Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, carolinakwamme@gmail.com

FRANCISCO DOURADO

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Centro de Pesquisas e Estudos sobre Desastres (CEPEDES), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, fdourado@cepedes.uerj.br

RESUMO ABSTRACT

Este artigo analisa o evento de movimento gravitacional de massa ocorrido na Praia de Itaguaçu em abril de 2022, após uma precipitação intensa. Trabalhos de campo e levantamentos aéreos utilizando drones foram conduzidos para caracterizar a morfologia da área afetada e obter dados geoespaciais de alta resolução. O estudo teve como objetivo estabelecer uma base empírica para compreender as características físicas e ambientais do deslizamento. A análise de fotografias aéreas e observações de campo revelou a presença de blocos de ortogneiss e charnockito ao longo de toda a cicatriz, além de um dique de diabásio no terço superior do movimento. Essas observações sugerem duas hipóteses para a origem do movimento: o rompimento do dique devido à saturação do solo ou a queda de blocos de ortogneisses que romperam o dique, causando o movimento. A região já enfrentou movimentos semelhantes no passado, incluindo tragédias como a da Enseada do Bananal em 2010. Reconhecer áreas potenciais para eventos semelhantes é desafiador, mas crucial para regiões a montante. Recomenda-se o mapeamento detalhado dessas áreas para prevenir futuras tragédias.

Palavras Chave: movimento de massa; Ilha Grande; Praia de Itaguaçu;

This article analyzes the gravitational mass movement event that occurred at Itaguaçu Beach in April 2022, following intense precipitation. Fieldwork and aerial surveys using drones were conducted to characterize the morphology of the affected area and obtain high-resolution geospatial data. The study aimed to establish an empirical basis for understanding the physical and environmental characteristics of the landslide. Analysis of aerial photographs and field observations revealed the presence of orthogneiss and charnockite blocks throughout the scar, as well as a diabase dike in the upper third of the movement. These observations suggest two hypotheses for the origin of the movement: dike breaching due to soil saturation or the falling of orthogneiss blocks that breached the dike, causing the movement. The region has experienced similar movements in the past, including tragedies such as the Bananal Cove in 2010. Recognizing potential areas for similar events is challenging but crucial for upstream regions. Detailed mapping of these areas is recommended to prevent future tragedies.

Keywords: mass movement; Ilha Grande; Itaguaçu Beach.

1. INTRODUÇÃO

Movimento de massa é um relevante processo natural que ocorre principalmente em regiões com relevo acentuado. Esses episódios envolvem um volume de rocha e/ou solo que se deslocam conjuntamente e, atuam na dinâmica das vertentes, sendo responsável pela evolução do relevo (SANTOS, 2007). Quando agravados pela falta de planejamento urbano são caracterizados como áreas de risco e podem vir a se tornar desastres.

Conforme dados do EM-DAT (2005), o século XX foi marcado pelo aumento substancial no número de eventos catastróficos, registrado em 56%, superando de forma considerável a taxa de crescimento populacional, que foi de apenas 15%. De acordo com Marcelino *et al.*, 2006, esse fato se deve em função do crescimento populacional, da segregação socioespacial, da acumulação de capital em zonas perigosas, do avanço das comunicações e das mudanças globais. No Brasil e em alguns países de clima tropical úmido, esse processo é resultado da combinação de eventos diversos com a vulnerabilidade física e/ou socioeconômica, onde destacam-se, a inevitabilidade de dominar espacialmente quais regiões são suscetíveis e quais possuem atributos potencializadores do risco (Furlan *et al.*, 2011).

O Estado do Rio de Janeiro ocupa a sexta posição entre os estados brasileiros a apresentar maiores riscos relacionados a desastres, segundo o Instituto Estadual do Ambiente (INEA, 2014). De acordo com dados do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED-UFSC, 2013), durante os anos de 1991 a 2012, o estado concentrou cerca de 79,8% dos movimentos de massa ocorridos no país, sendo também o estado com maior número de mortes causadas por deslizamentos, registrando 3,8 vezes mais mortes que o estado de São Paulo, que ocupa a segunda posição.

Nesse contexto, o município de Angra dos Reis, localizado no litoral sul do estado do Rio de Janeiro, sustenta uma história de cicatrizes oriundas de um contexto que favorece movimentos de massa, ocupando a 8ª posição entre os municípios brasileiros com maior número de fatalidades no

período entre 1988 e 2022 (Macedo *et al.*, 2022). Isso se deve a uma combinação de fatores, como o relevo íngreme, a planície costeira pouco extensa, solos propensos à erosão e instabilidade, ocupação irregular de encostas e um dos maiores índices pluviométricos do país. Tais condições, quase sempre, conduzem a danos territoriais, econômicos e de vidas.

Dentre os maiores desastres ocorridos nessa região, destacam-se os dos dias 09 de dezembro de 2002 e 01 de janeiro de 2010, quando a região da Costa Verde foi marcada por eventos de precipitação intensa de longa duração que culminou no deslizamento de encostas e enchentes em diversos pontos da cidade, o que acabou afetando intensamente áreas povoadas e não povoadas. Em abril de 2022, segundo o Boletim Oficial da Prefeitura de Angra dos Reis (2022) 592 mm de chuva foram registrados na Ilha Grande, sendo fator deflagrador para o deslizamento de grande proporção que encurtou a faixa de areia e provocou danos na praia de Itaguaçu, evento tema desta dissertação.

Nesse contexto, esse trabalho teve como objetivo principal analisar detalhadamente o evento de movimento de massa gravitacional que ocorreu na Praia de Itaguaçu em abril de 2022. Esta avaliação foi realizada por meio da aplicação de geotecnologias, mapeamento geológico, bem como pela utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para o processamento dos dados.

2. ÁREA DE ESTUDO

Localizada no litoral sul do Estado do Rio de Janeiro, a Ilha Grande faz parte do município de Angra dos Reis (Figura 1). Com uma extensão de 193,000,000 m², é a terceira maior ilha oceânica do Brasil, apresentando 155,000 m de litoral, 106 praias e abrigando um dos maiores remanescentes de Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro (Sampaio, 2005). É separada a oeste pela Baía de Ilha Grande, a leste pela Baía de Sepetiba e norte pelo canal central, sendo este o mais próximo do continente.

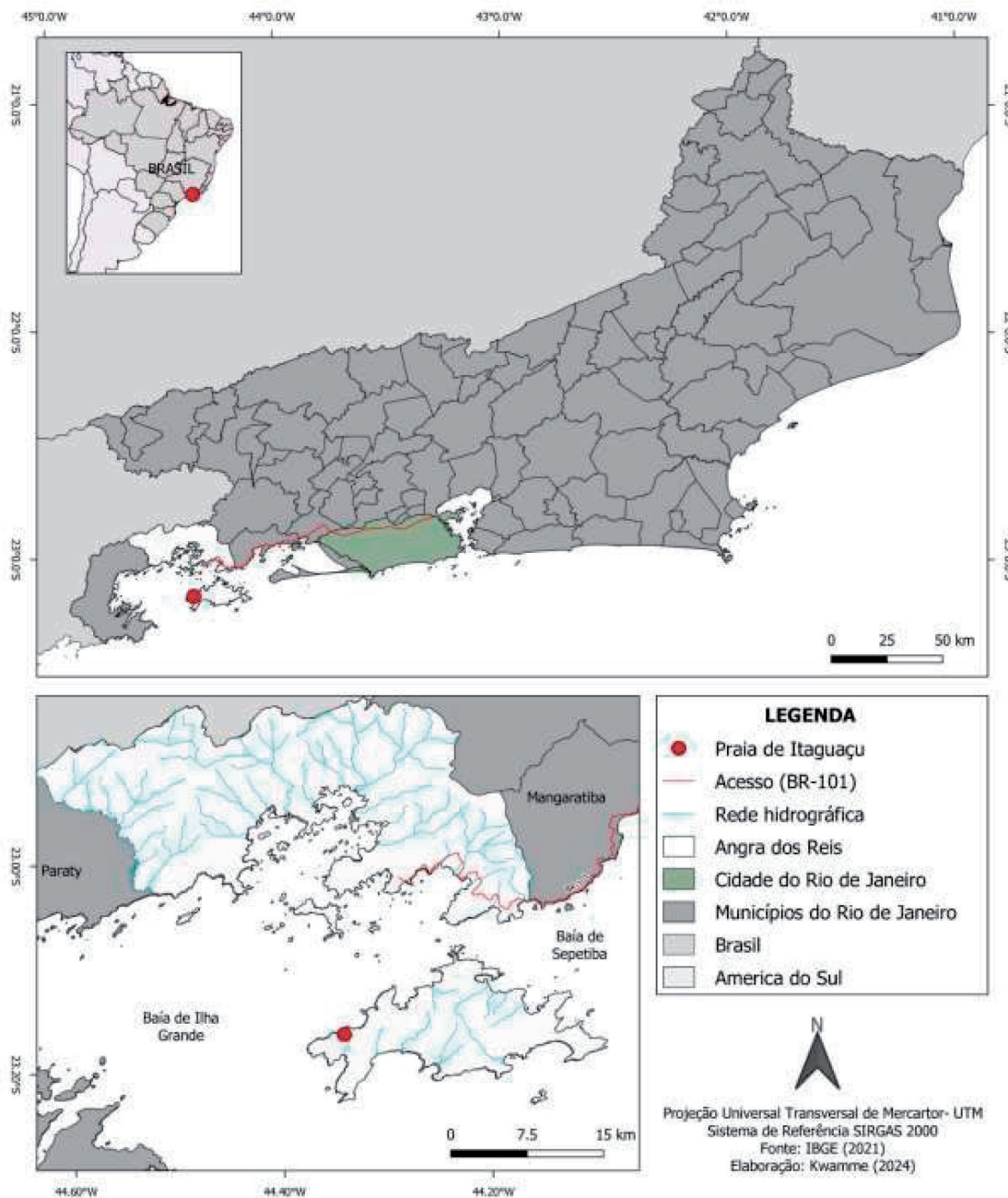


Figura 1 - Mapa da área de estudo e principais acessos.

A Ilha Grande constitui um fragmento do maciço litorâneo, caracterizado por um relevo bastante acidentado. Suas maiores elevações estão localizadas na região centro-leste, destacando-se a Serra do Papagaio, com altitude de 1031 m, e o Pico do Papagaio, com 959 m de altura. Ambos os picos fazem parte da formação Granito Vila Dois Rios, conforme observado por Dantas (2000). Segundo Gama *et al.* (2009), a evolução geomorfológica da região teve início associado à tectônica

Mesozóica/Cenozóica, que resultou no soerguimento das rochas do embasamento, compostas por gnaisses, granitos e charnockitos. Uma vez expostas às condições do clima tropical úmido presente na região, essas rochas sofrem um intenso processo de intemperismo superficial. Como consequência, a erosão atua no transporte e deposição do material intemperizado através dos rios, ondas, marés, fluxos gravitacionais e ventos, contribuindo para a formação das planícies cos-

teiras flúvio-marinha e praias arenosas. A Ilha é compartimentada em duas vertentes, no sentido leste-oeste: a escarpa sul, voltada ao

oceano aberto e a escarpa Norte, voltada ao continente, onde se encontra a área de estudo. Ambas as vertentes apresentam encostas íngremes com picos, costões, canais fluviais retilíneos bem encaixados e depósitos de tálus e colúvios, formados através da erosão e movimentos de massa (Heilbron *et al.*, 2007).

Por possuir relevo predominantemente escarpado e montanhoso, a Ilha Grande possui grande parte de seu território em domínio de Mata Atlântica, apresentando fitofisionomia de floresta ombrofíla densa, restinga, mangue, brejos, lagoas e florestas alagadas (Veloso *et al.*, 1991, Alho *et al.*, 2002, IBGE, 2013), em diferentes níveis de regeneração (Antonini e Nunes-Freitas, 2004). Devido ao seu significativo potencial ecológico, a Ilha Grande é protegida por Unidades de Conservação, são elas: Parque Estadual da Ilha Grande, Reserva Biológica da Praia do Sul, Área de Proteção Ambiental dos Tamoios e Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Aventureiro, todos sobre administração do INEA.

De acordo com a classificação climática de Köppen, 1948, a região apresenta clima tropical quente e úmido (Af), sem estação seca, com uma temperatura média anual variando entre 20° C a 26° C. Durante o verão, a temperatura pode atingir até 39°C, acompanhada por chuvas intensas na região. De acordo com Nimer (1979), os fatores que influenciam esse comportamento pluviométrico são principalmente estáticos, como a localização geográfica e topografia, e dinâmicos, como as massas de ar. Nesse sentido, a Serra do Mar desempenha um papel crucial como uma barreira orográfica, contribuindo significativamente para as elevadas precipitações na região. A combinação dos fatores

latitude e proximidade do mar favorece condições propícias para forte radiação solar, fornecimento de umidade e formação de núcleos de condensação. Esses elementos, aliados à posição da serra em relação à trajetória dos sistemas frontais e linhas de instabilidade, resultam em um dos maiores índices pluviométricos do país, geralmente superior a 2000 mm (Salgado & Vasquez, 2009). A abundante precipitação gera uma rede de

cursos d'água de diferentes tamanhos, agrupados em 79 pequenas bacias hidrográficas pertencentes à Região Hidrográfica da Baía de Ilha Grande (RH-1) (Rosa *et al.*, 2009, INEA, 2013). Inúmeros riachos de 1ª e 2ª ordem drenam as vertentes ocidental e oriental da ilha. Os sistemas fluviais são, em geral, caracterizados por pequeno percurso e declive acentuado, além de diversos trechos onde a drenagem é subterrânea (Mazzoni e Silva, 2006).

A classe de solo predominante na região é o cambissolo háplico típico distrófico, que se caracteriza por apresentar solos minerais pouco desenvolvidos, ainda em estágio incipiente de evolução pedogenética. Esses solos frequentemente demonstram perfis rasos e pouco profundos, especialmente em áreas de relevo montanhoso. A combinação desses fatores resulta em uma permeabilidade muito baixa, aumentando a suscetibilidade à erosão, formação de sulcos e escoamento superficial (EMBRAPA, 2006).

Quanto à sua geologia, a região está inserida no domínio costeiro do terreno oriental do Orógeno Ribeira, onde a colisão entre duas paleoplacas durante as etapas colisionais da Orogênese Brasileira entre o Neoproterozoico e o Ordoviciano originou gnaisses e granitos sin e pós-colisionais (Heilbron *et al.*, 2004; Eirado Silva *et al.*, 2006). Essas rochas são testemunhas da complexa evolução tectônica e magmática que moldou a região ao longo do tempo. A área afetada pelo escorregamento faz parte da Suíte Charnockítica Ilha Grande (NP3γ3ig), caracterizada por rochas plutônicas que se assemelham a granitos, com uma variação composicional que vai de granodiorítica a tonalítica. São encontradas em grande parte da cicatriz com aspecto maciço e granulometria de fina a média, sendo encontrados em menor quantidade com textura porfirítica, apresentando pórfiros de k-feldespato de 0,02 m de comprimento em matriz fina. Essas rochas são intrusivas ao Complexo Rio Negro (Np2γ1rn), que na região se apresenta como uma faixa alongada em direção NE/SW de ortognaisses, que se apresentam principalmente, como hornblenda-biotita gnaiss migmatítico de composição que varia de granodiorítica a tonalítica. Ainda, é possível encontrar enclaves máficos de dioritos e quartzo dioritos. Segundo Heilbron *et al.* (2007), os ortognaisses desta unidade são derivados de rochas granitóides metamorfizadas na

fácies anfibolito alto, com geração de anatexia local que conferiu este aspecto migmático presente. Logo abaixo da zona de ruptura, na porção superior da cicatriz, seguindo a mesma direção NE do embasamento pré-cambriano (Complexo Rio Negro), encontra-se exposto um dique de diabásio de espessura aproximada de 2 m, possuindo zoneamento textural marcante. Os diques de diabásio encontrados constituem a unidade litológica formada durante a Tectônica Mesozóica/Cenozóica. São da família dos basaltos, de granulação fina, escuros e compostos principalmente dos minerais plagioclásio, piroxênio e anfibólio (Guedes, 2007).

A praia de Itaguaçu (Ita- pedra, Guaçu- grande), local onde ocorreu o deslizamento, tema cen-

tral deste estudo, é uma praia semi deserta com cerca de 100 m de extensão localizada na porção oeste da ilha (Figura 2). O acesso à praia do Gaúcho, como também é conhecida, se dá por via marítima, através de embarcações que partem do porto de Angra dos Reis, Mangaratiba e Conceição de Jacaréi. Todos esses portos são acessíveis a partir da cidade do Rio de Janeiro, via Rodovia Rio Santos (BR-101). O desembarque é feito no cais da Praia Vermelha ou de Araçatiba, onde uma trilha costuma levar até o local. Após o deslizamento, entretanto, a trilha foi temporariamente interditada e o acesso à praia está limitado exclusivamente a via marítima por barcos privados.

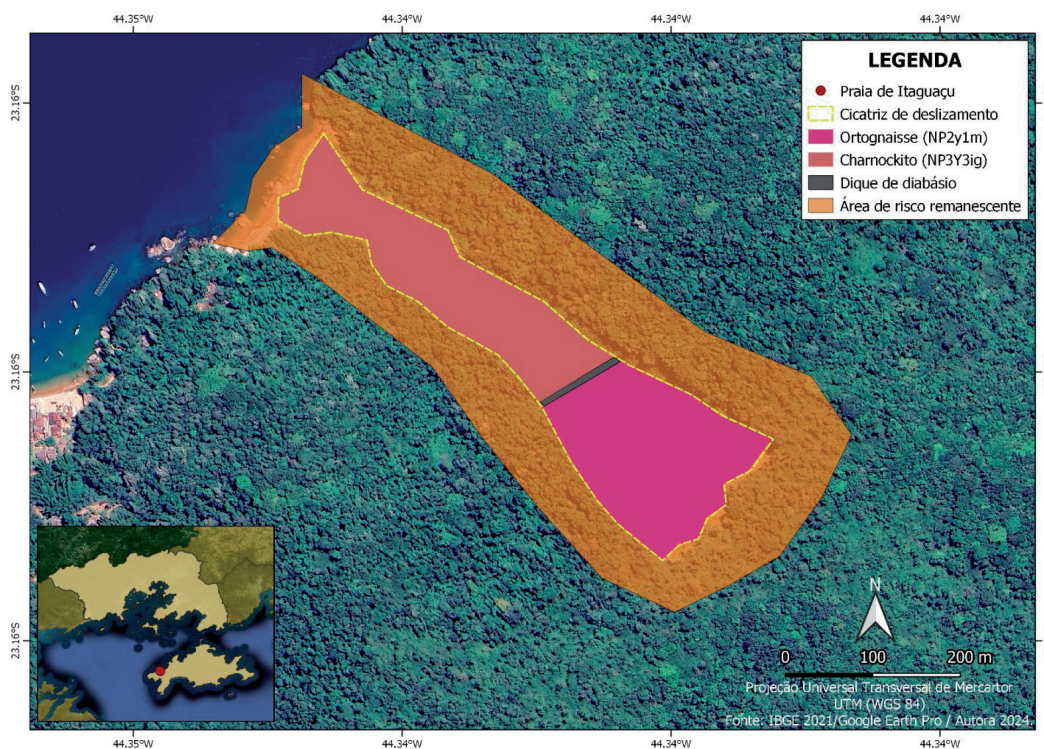


Figura 2 - Mapa da cicatriz de deslizamento presente na área de estudo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise de um evento de grande magnitude, como o ocorrido na Praia de Itaguaçu, requer uma investigação minuciosa e abrangente das características intrínsecas do local e dos fatores que contribuíram para a deflagração do movimento. Nesse contexto, o trabalho foi realizado em duas etapas distintas de campo: levantamento aerofotogramétrico com drone e mapeamento da área.

ETAPA 1: LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO COM DRONE

A primeira etapa, realizada em julho de 2022, envolveu o levantamento aéreo utilizando um drone, com o objetivo de adquirir dados geoespaciais de alta resolução da área de interesse. Esses dados possibilitaram uma análise precisa e detalhada da cicatriz de deslizamento.

O uso de drones foi empregado como uma ferramenta fundamental na obtenção de imagens de alta resolução da área de interesse, visando a geração de modelos digitais de elevação (MDE) e ortomosaicos. A Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) utilizado pelo estudo trata-se do Mavic Pro Platinum, da empresa chinesa DJI, sendo considerado um dos drones de baixo custo mais portátil atualmente, possuindo tempo de voo de até

30 minutos aliado a redução de ruídos de 60 %. Possui 5 sensores visuais e uma câmera de 12,35 megapixels acoplada, suportada por um estabilizador triaxial (inclinação, rotação, giro). Também conta com um alcance estimado de 7000 m (DJI, 2018). Além disso, para a execução da atividade foi necessário um tablet para o comando e envio do plano de voo para o RPA. O fluxo de trabalho está exemplificado na figura 3.

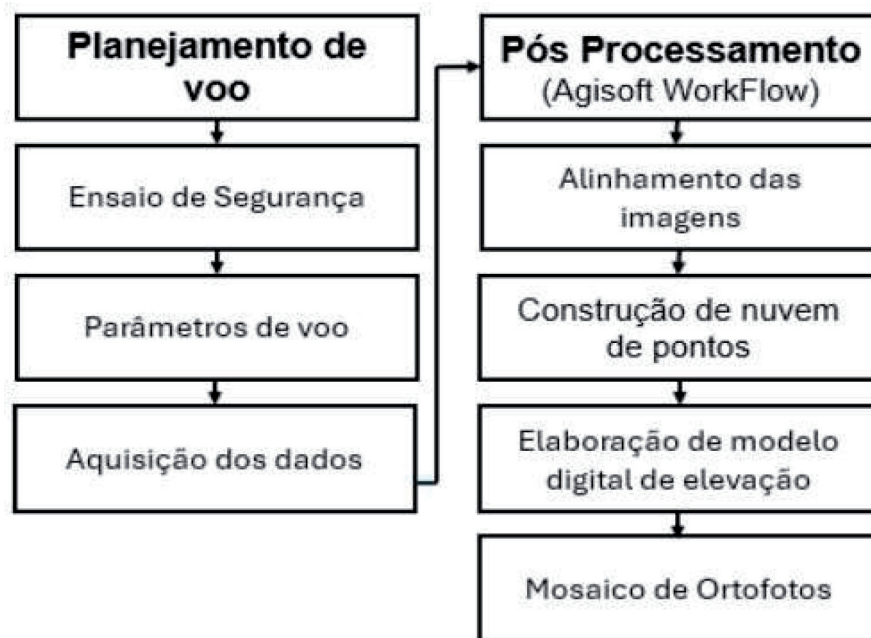


Figura 3 - Fluxo de Trabalho

O planejamento cuidadoso da coleta de dados é um passo fundamental para garantir a eficiência e a qualidade dos resultados obtidos. Após a delimitação da área de estudo, procedeu-se à avaliação da viabilidade operacional durante a fase de ensaio de segurança. Este ensaio consistiu em uma investigação de campo abrangente, na qual foram considerados diversos fatores, tais como: a proximidade com aeroportos, as condições climáticas locais, os locais adequados para decolagem e aterrissagem das aeronaves, a topografia do terreno e a presença de obstáculos urbanos. A avaliação de tais fatores se mostrou necessária para garantir a segurança de pessoas e equipamentos. Para tal, a utilização do aplicativo gratuito UAV forecast se revelou indispensável para um voo em condições ideais. O dispositivo forneceu uma descrição clara das velocidades do vento, chance de chuva, visi-

bilidade e temperatura local, cobertura de nuvens e monitor de índice KP, que calcula as chances de ocorrer interferência no GPS. Além disso, outro recurso oferecido foi a possibilidade de visualizar as previsões de hora em hora para a semana, o que permitiu planejar o voo com antecedência. O planejamento de voo pôde ser realizado através do aplicativo DroneDeploy, versão 4.10, onde os seguintes parâmetros foram considerados: resolução das imagens, altura de voo em rota e a quantidade de fotos tiradas. Após solicitar permissão e a verificação dos planos de voo ao Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS), órgão da entidade governamental Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), o RPA pôde ser implantado para aquisição dos dados. A aquisição das imagens ocorreu no dia 9 de julho de 2022 na região da praia de Itaguaçu.

O processamento das imagens coletadas em campo foi conduzido utilizando o software de fotogrametria *Agisoft Metashape*, versão 1.7.2, desenvolvido pela empresa russa *Agisoft*. O procedimento seguiu um *workflow* padrão para a construção de um Modelo Digital de Elevação (MDE). Este processo incluiu as seguintes etapas: alinhamento das imagens, geração da nuvem esparsa, geração da nuvem densa e construção do modelo digital por meio da geração e texturização da malha triangulada.

Durante o *workflow*, foram adotados parâmetros baseados em estudos anteriores (Carrivick *et al.*, 2016; Cawood *et al.*, 2017). No alinhamento das imagens, foram definidos critérios como alta acurácia para estimativa precisa do posicionamento das câmeras, pré-seleção de pares de referência para correspondência de recursos detectados nas fotos, limitação de pontos-chave a 40.000 por imagem e um limite máximo de pontos correspondentes também de 40.000, além da exclusão de pontos de amarração estacionários. Além disso, foi empregada a técnica de Fototriangulação para determinar as coordenadas do terreno a partir de um referencial. O resultado esperado foi a geração de uma nuvem de pontos esparsa (Figura 4A).

Após a geração da nuvem de pontos esparsa, o segundo passo envolveu a densificação desses pontos (Figura 4B). Basicamente, o software aumentou a densidade da nuvem, preenchendo

espaços vazios para uma representação mais precisa da área mapeada. Os parâmetros utilizados para essa etapa incluíram a configuração de “Alta qualidade” para garantir uma alta resolução e o “Filtro de profundidade” em um nível moderado para classificar e remover pontos discrepantes. Essa etapa é crucial para a geração do Modelo Digital de Superfície (MDS) e do Modelo Digital de Terreno (MDT).

Com a nuvem densa gerada, prosseguiu-se para o terceiro passo, que consistiu na criação da malha triangulada. Nesta etapa, determinou-se o tipo de superfície como “arbitrária” (3D). Além disso, foi estabelecido um número máximo de polígonos na malha final, conhecido como contagem de faces, configurado como médio. Por fim, permitiu-se a interpolação, responsável por preencher áreas superficiais dentro de um raio específico em torno de cada ponto da nuvem densa.

O quarto e último passo diz respeito à construção do modelo digital, no qual foi aplicada texturização para melhorar a representação visual (Figura 4C). Os parâmetros definidos incluíram o tipo de textura “difusa”, o modo de mapeamento “Keep uv” e o modo de mesclagem “mosaico”, que determina como os valores de pixel de diferentes fotos serão combinados na textura final. Esse processo resultou na criação de superfícies tridimensionais que representam fielmente o terreno mapeado

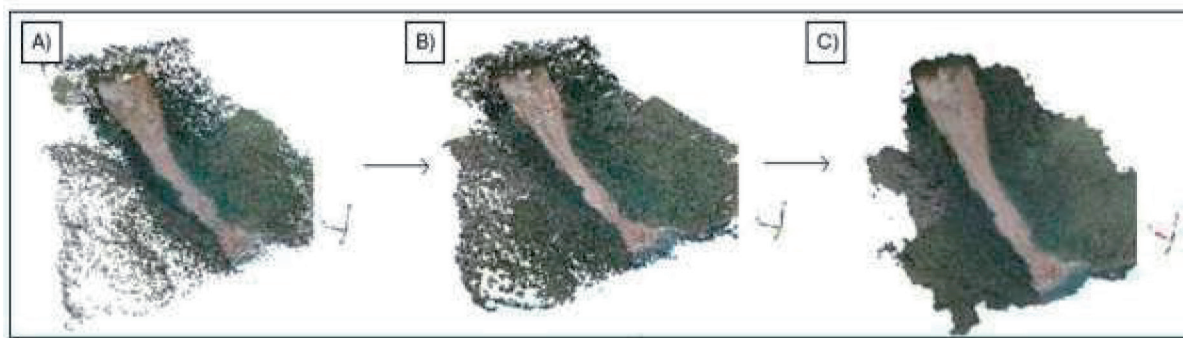


Figura 4 - Modelos digitais de afloramento (A) Nuvem de pontos esparsa (B) Nuvem de pontos densa e (C) Nuvem de pontos densa texturizada

No estágio final do *workflow* do Agisoft, ocorre a criação do Modelo Digital de Elevação (MDE) e da ortofoto (Figura 5a, 5b). Utilizando a nuvem densa como base, o software processa os dados para gerar o MDE, oferecendo uma representação tridimensional precisa do terreno com detalhes como elevações e declives. Em seguida, a partir dessa mesma nuvem densa, é produzida a ortofoto-

to, uma imagem ortogonal retificada que oferece uma visualização aérea do terreno, corrigida para distorções de perspectiva e inclinação. Essas etapas finais do processo asseguram a obtenção de produtos cartográficos de alta qualidade, fundamentais para a análise de feições morfológicas, a estimativa de volume de material deslizado e o monitoramento contínuo da área.

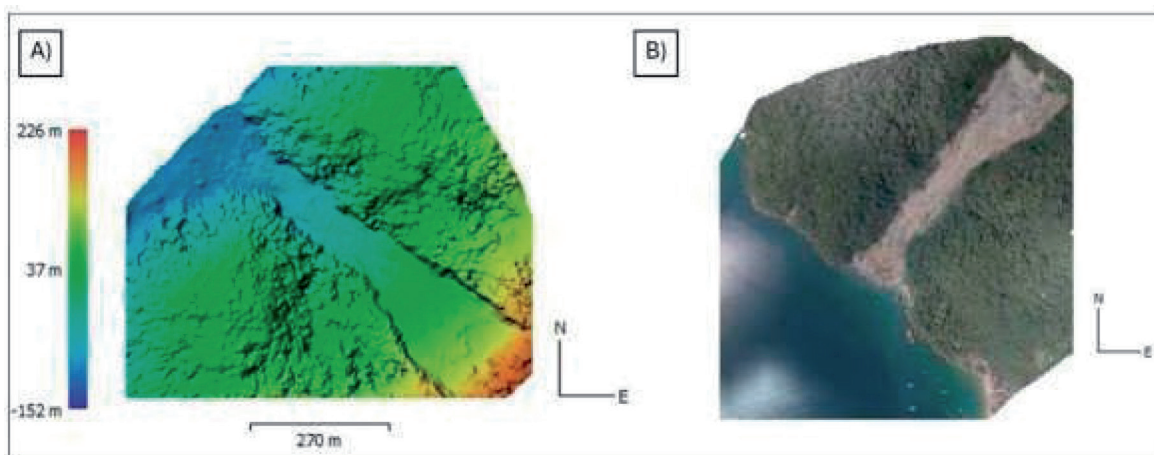


Figura 5 - (A) Modelo Digital de Elevação (MDE) e (B) Ortofoto

O tempo de processamento dessas etapas depende da quantidade de pontos presentes na nuvem, responsável também pela resolução do modelo. Assim, quanto maior a resolução do modelo, maior será o tempo de processamento e mais fácil será a identificação das feições. No trabalho em questão, a nuvem densa foi gerada em um tempo de 1 hora e 23 minutos com uma resolução centimétrica.

A partir do produto obtido nas etapas anteriores, foi realizada a integração da base de dados: i) medidas realizadas pelo RPA e as informações de terreno (fotos e dados de alta resolução e ii) Base de dados referente ao SIG (mapas, plantas, fotos, dados georreferenciados e informações locais da área. Os softwares de apoio para essa etapa do trabalho foram: Agisoft Metashape (versão 1.7.2), para a geração do MDE e do ortomosaico, Adobe Illustrator (versão 25.2.1), para produção do perfil topográfico e Qgis (versão 3.4.12), para produção dos mapas temáticos.

A base de dados espaciais, informações cartográficas, essenciais para a geração dos mapas temáticos, foi fornecido pelo Sistema Integrado

de Bases Georreferenciadas do Rio de Janeiro – Geobases, envolvendo banco de dados e uma base cartográfica digital sendo os seguintes planos de informação utilizados no formato “shape-file” (.shp): curva de nível de 20 m; hidrografia; localidades; municípios; pedologia. Os dados utilizados para a confecção do mapa de declividade foram obtidos por meio do conjunto de dados de Altitude SRTM, com resolução de 30 m, fornecido pela NASA (<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>)

A integração correspondeu uma etapa fundamental na análise e interpretação a fim de se obter os resultados desejados para o estudo. Vale ressaltar a importância do mapeamento aéreo em regiões como a da praia de Itaguaçu, onde o acesso é extremamente limitado e o drone se faz fundamental diante da impossibilidade de outros tipos de análise.

ETAPA 2: MAPEAMENTO DA CICATRIZ

O mapeamento da área onde se encontra a cicatriz de deslizamento foi realizado em duas

fases. A primeira ocorreu em julho de 2022, apenas alguns meses após o evento, onde foram realizados o levantamento aéreo e o reconhecimento preliminar da área. A segunda etapa de campo foi realizada mais de um ano após o evento, em novembro de 2023, durante a qual uma investigação mais detalhada da

área foi conduzida, onde foi possível obter dados importantes sobre a geometria da cicatriz, a composição do solo e da rocha, os padrões de drenagem, a distribuição da vegetação e a topografia local (Figura 6a, b,c,d).

O objetivo primário ao realizar o mapeamento em dois períodos distintos foi obter uma base de dados empírica sólida e objetiva para entender as características do deslizamento, bem como para observar as mudanças ocorridas na área afetada. Isso incluiu a avaliação de possíveis riscos residuais e, mais importante, uma compreensão mais aprofundada dos processos pós-deslizamento. Essa abordagem permitiu a formulação de hipóteses, teorias e modelos sobre o evento que afetou a praia de Itaguaçu.

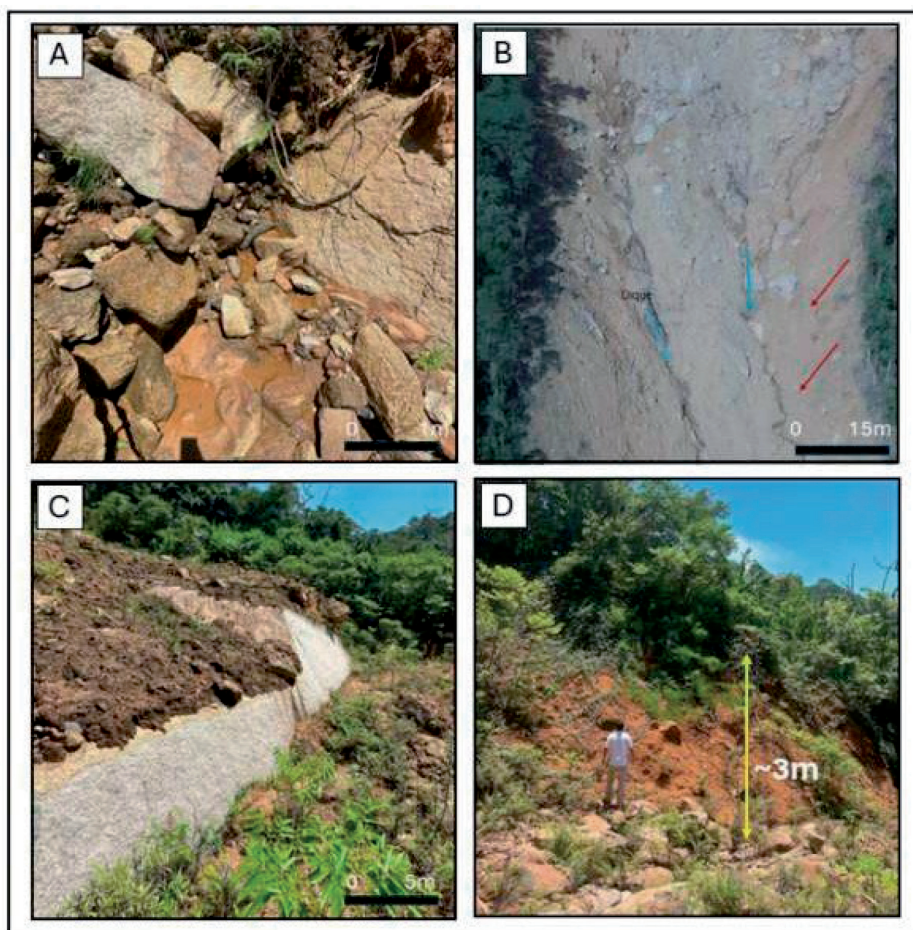


Figura 6 - Imagens coletadas em campo na cicatriz de deslizamento; em A) drenagem bloqueada B) drenagem vista através de levantamento aéreo, C) Bloco de charnockito na parte central do deslizamento e D) espessura da cicatriz. Sendo o maior volume registrado para o mês de abril

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos dias 1 e 2 de abril, conforme registrado no Boletim Oficial da Prefeitura de Angra dos Reis (2022), ocorreram intensas precipitações, sendo o maior volume registrado para o mês de abril desde 1913, totalizando 655 mm de chuva

no continente e 592 mm na Ilha grande. A ocorrência desencadeou uma série de desastres, como inundações, deslizamentos de terra, enxurradas e alagamentos, resultando em uma significativa comoção social, com pessoas deslocadas de suas residências, desabrigadas, comunidades isoladas, e uma série de danos e prejuízos econômicos, so-

ciais e ambientais. Na ocasião, quatro residências foram atingidas e 11 pessoas ficaram soterradas no bairro de Monsuaba, na parte continental. Nas comunidades da Ilha Grande, como Araçatiba, Vermelha, Provetá, Abraão e Aventureiro, os danos foram consideráveis, com a praia de Itaguaçu sendo a mais afetada.

O fenômeno ocorrido na praia de Itaguaçu envolveu a movimentação estimada de cerca de 70.368 m³ de solo, impactando uma área total de 70.551 m² que se estende de 630 m por uma largura média de 115 m. Antes do evento, a encosta estava recoberta por vegetação nativa preservada e segundo dados da Defesa Civil, três residências localizadas na base da encosta, foram completamente destruídas durante o evento, resultando em três vítimas. Nesse contexto, os fatores determinantes para a ocorrência do movimento foram as características climáticas, pedológicas, geológicas e geomorfológicas inerentes à região.

A partir da análise dos dados coletados, duas hipóteses são levantadas para explicar o movimento ocorrido na encosta da Praia de Itaguaçu. Em ambos os cenários, o deslocamento mani-

festou-se como planar translacional com queda de blocos, sendo o perfil de intemperismo constituído por rocha alterada e solo residual pouco espesso, seguindo o curso da drenagem em duas vertentes (Figura 7). O fator deflagrador foram as chuvas intensas que impactaram a localidade nas horas anteriores ao evento, resultando na saturação do solo e rompimento no contato solo-rocha.

Na primeira hipótese, sugere-se que o movimento teve início no topo da crista (Figura 8A), onde o ortognaisse altamente fraturado foi sujeito a um processo de pressão hidráulica nas paredes das fraturas, resultando no descolamento nas trincas de tração e, conseqüentemente, a queda do bloco (Figura 8B). Devido à ação da gravidade, esse material deslizou para jusante, chocando-se em um dique de diabásio, entre os terços superior e médio da encosta (Figura 8C). O material depositado, ainda sujeito à poropressão positiva e à sobrecarga da vegetação, desencadeou um segundo movimento (Figura 8D), quase concomitante. Esse material remobilizado depositou-se na porção baixa da encosta, formando depósito de tálus na base.

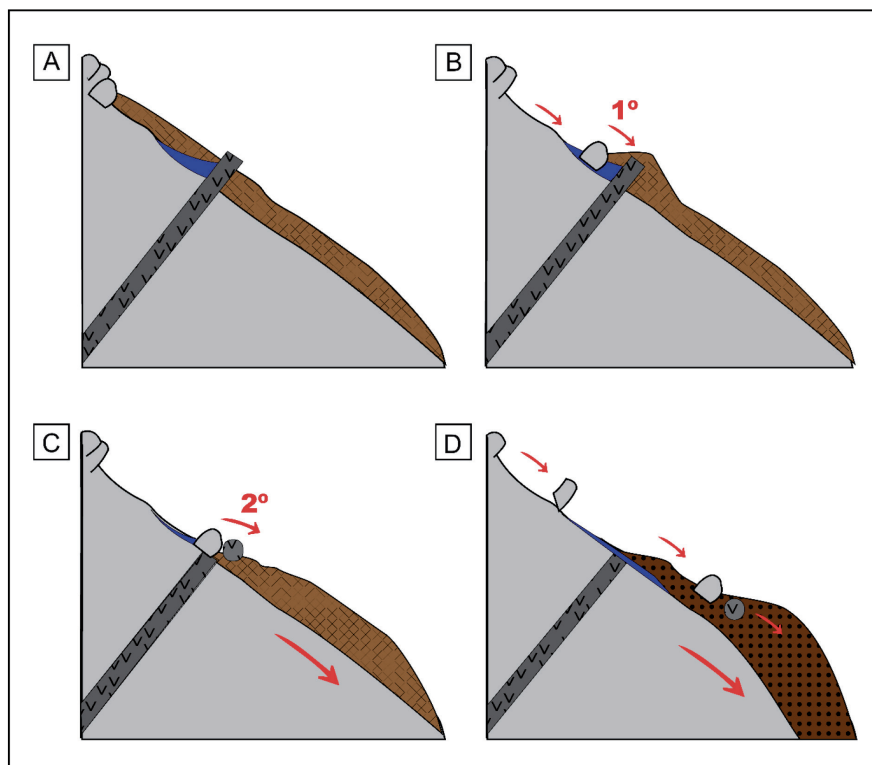


Figura 7 - Perfil esquemático da Hipótese 1 do deslizamento ocorrido na praia de Itaguaçu. A) Ortognaisse sofrendo pressão hidroestática sobre paredes das fraturas B) Descolamento das trincas de tração e conseqüente queda do bloco C) Bloco de ortognaisse choca-se contra dique de diabásio D) ruptura do bloco de diabásio juntamente ao deslocamento do solo a jusante formando o depósito de tálus.

A segunda hipótese propõe que o movimento teve início na porção central da encosta, no contato do dique com o ortognaisse (Figura 9A). Nesse cenário, a saturação do solo depositado acima do dique resultou no aumento da poropressão que culminou na ruptura e deslocamento do bloco de diabásio a jusante (Figura 9B). Esse movimento

fez com que os blocos de ortognaisse do topo da encosta perdessem o suporte da base, o que provocou uma instabilidade repentina, resultando em um segundo deslizamento, quase simultâneo ao inicial, onde houve a ruptura e queda deste bloco. O material mobilizado depositou-se na base (Figura 9 C).

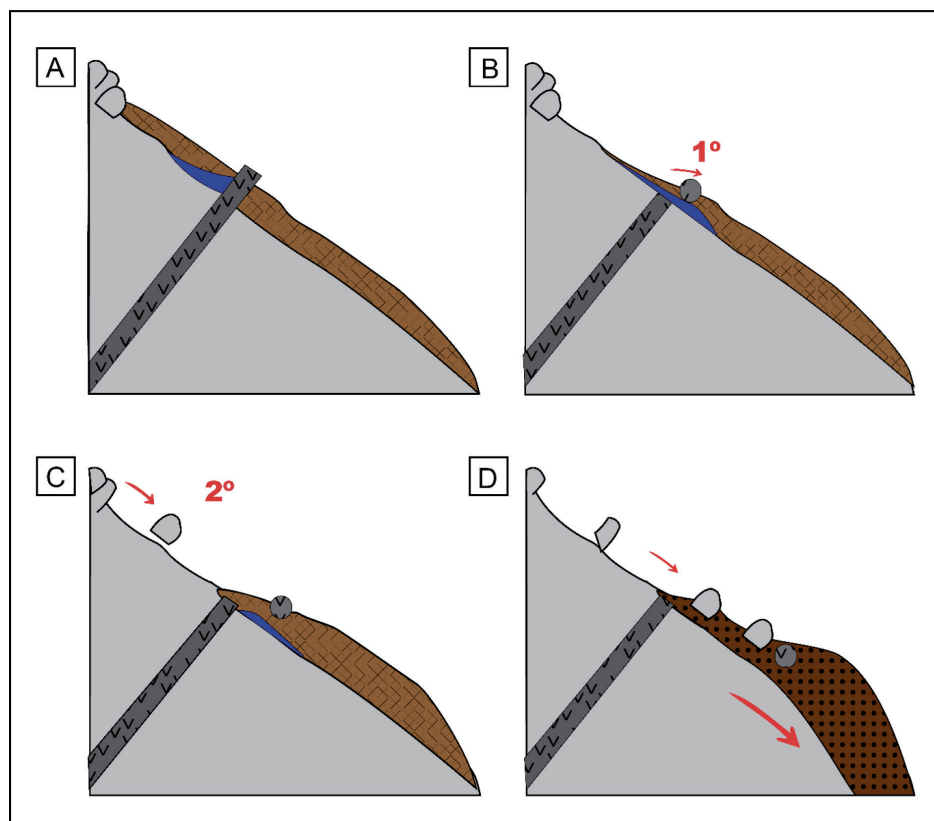


Figura 8 - Perfil esquemático da Hipótese 2 do deslizamento ocorrido na praia de Itaguaçu. A) Saturação do solo depositado sobre o dique B) Ruptura e deslocamento do bloco de diabásio C) Descalçamento do bloco de Ortognaisse a montante e D) Queda do Bloco de ortognaisse e junto com solo e formação do depósito de tálus.

Ambas as hipóteses foram formuladas a partir dos dados coletados em campo juntamente a estudos de bibliografias sobre a área. Não é possível determinar com certeza qual hipótese corresponde com mais precisão ao deslizamento ocorrido em 2022, objeto deste estudo; No entanto, alguns pontos devem ser levados em consideração.

A região é caracterizada pela presença de um dique de diabásio orientado no sentido NE, alinhado de forma concordante com a foliação do embasamento. Esta mesma orientação é predominantemente observada no sistema de fraturas e falhas da área. A presença desta intrusão pode ter causado fraturamento e enfraquecimento das

rochas circundantes (charnockito e ortognaisse), criando zonas de fraqueza propensas a falhas e instabilidades. Além disso, ao gerar discontinuidades geométricas na encosta, o dique pode ter contribuído para o acúmulo de água, facilitando a infiltração e o enfraquecimento do solo. Ainda, existe uma diferença na resistência à erosão entre o dique de diabásio e as rocha encaixantes (ortognaisse e charnockito). Isso se deve ao fato que o aspecto migmatítico do ortognaisse presente na área apresenta zonas de fraqueza devido a diferenciação mineral ocorrida durante processos metamórficos enquanto o charnockito apresenta uma foliação incipiente atribuída a processos magmá-

ticos, tornando-o mais propenso à ocorrência de fraturas em comparação ao diabásio. Este último, dentro do contexto da região, exibe uma textura mais homogênea e menos zonas de fraqueza. Essa diferença contribui para a erosão diferencial, na qual a água da chuva erode mais

rapidamente o solo adjacente ao dique, criando uma diferença de altura entre as áreas erodidas e as áreas adjacentes. Essa variação de altura pode resultar no colapso e deslizamento do solo.

A cicatriz de deslizamento apresenta sinais evidentes de influência hidrológica, evidenciada pela

presença de drenagem ativa e sinais de fluxo de água recente. Ao examinar a área afetada, observa-se a presença de canais de drenagem naturalmente formados ao longo das margens da cica-

triz. Esses canais exibem características de erosão, indicando um fluxo significativo de água durante ou após o evento de deslizamento, que pode ter contribuído significativamente para a saturação do solo.

A encosta da praia de Itaguaçu exibe um perfil morfológico com um declive predominantemente abrupto ($>45\%$) em seu topo e moderado a íngreme em seu corpo ($15-45\%$), sem apresentar nenhuma área de relevo suave (Figura 10). O contato solo-rocha em declividades elevadas como estas, costuma ser raso. Nesse contexto, quando associado com os altos índices pluviométricos que afetam a região, esses fatores tornam a encosta propensa a deslizamentos como o ocorrido recentemente.

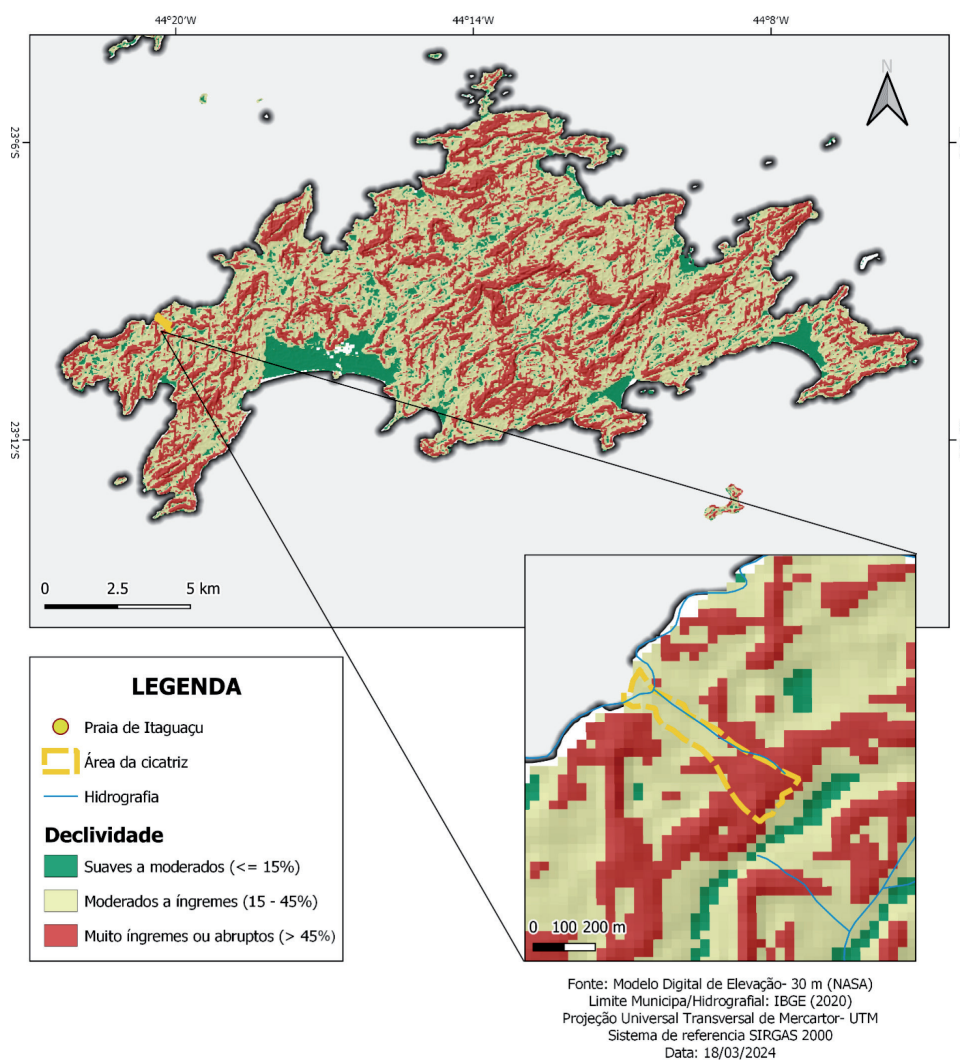


Figura 9 - Mapa de declividade da área de estudo

Por fim, analisando as imagens coletadas no período de um ano após o evento (Figura 11), é evidente que a área da cicatriz de deslizamento está passando por um processo de regeneração, indicando uma resposta positiva do ambiente

após o deslizamento. Uma característica notável é a progressiva regeneração natural, com a presença de arbustos com altura de até 5 m, sobretudo no sopé da encosta, onde uma grande parte do material proveniente do deslizamento foi depositada.



Figura 10 - Área da cicatriz de deslizamento em 2022, logo após o deslizamento e em 2023, um ano após o evento.

O solo na área está atravessando um processo de regeneração, caracterizado por uma progressiva consolidação e restauração da sua estrutura. Os sinais de erosão superficial estão diminuindo gradualmente, ao passo que a reintegração de nutrientes e a formação de horizontes distintos indicam um retorno à fertilidade do solo. É provável que as drenagens pré-existentes na região tenham sido alteradas devido a obstrução ou desvio pelo deslocamento do material durante o deslizamento. Os novos canais agora fornecem uma rota para

a drenagem pluvial, contribuindo para a estabilidade hidrológica e a resiliência do sistema.

Esta evolução da encosta é uma demonstração da capacidade do ambiente de se adaptar a perturbações e de se recuperar ao longo do tempo. No entanto, é importante reconhecer que o processo de regeneração completa da área da cicatriz de deslizamento pode ser prolongado e dinâmico, sujeito a influências climáticas e geológicas variáveis. Os avanços observados até o momento destacam a resiliência intrínseca dos ecossistemas

diante de perturbações naturais, enfatizando a importância da conservação e da gestão responsável dos recursos naturais em ambientes propensos a deslizamentos.

5. CONCLUSÕES FINAIS

Ilha Grande, localizada em Angra dos Reis - RJ, é considerada um dos principais patrimônios naturais do Estado do Rio de Janeiro, sendo a terceira maior ilha oceânica do Brasil e abrigando um vasto remanescente de Mata Atlântica. Devido às suas características geográficas, geológicas e, especialmente climáticas particulares, a região apresenta uma história marcada por cicatrizes resultantes de movimentos de massa.

O deslizamento ocorrido na encosta da Praia de Itaguaçu, em abril de 2022, foi um desses eventos significativos que deixaram marcas na história da região. Desencadeado por chuvas intensas, esse episódio resultou em um movimento de massa que afetou uma área considerável, envolvendo aproximadamente 70.368 m³ de solo e abrangendo uma extensão total de 70.551 m². Como consequência, três residências situadas na base da encosta foram completamente destruídas, resultando em três vítimas fatais.

O objetivo deste estudo foi estabelecer uma base empírica para ajudar a compreender as causas, mecanismos e fatores que levaram ao deslizamento. Nas fotografias aéreas observou-se a presença de blocos de ortognaisse na coroa da cicatriz do movimento ligeiramente deslocados para jusante do seu lugar de origem. No trabalho de campo também foi observada a presença destes blocos na zona de transporte do movimento. Entre o terço superior e o terço médio da cicatriz foi observada a presença de um dique de diabásio. Associando estas duas observações, propôs-se duas hipóteses para a origem do movimento: o rompimento do dique causado pela sobrecarga devido a saturação do solo confinado a montante ou a queda de um ou mais blocos de ortognaisse a partir do topo da cicatriz que romperam o dique causando o movimento. A metodologia proposta demonstrou sua eficácia em áreas de difícil acesso, como a enseada da região de estudo, localiza-

da em uma região insular com encostas íngremes (>45%) e acesso limitado.

Este mecanismo de movimento já foi observado várias vezes na região, em algumas vezes causando tragédias como a da enseada do Bananal em 2010. Apesar da dificuldade no reconhecimento de áreas potenciais para a ocorrência de novos eventos controlados por este mecanismo, é de grande importância a atenção das áreas a montante de regiões habitadas ou de uso regular. Se identificadas as mesmas condições, sugere-se o mapeamento detalhado destas áreas a fim de evitar tragédias como as citadas se repetam.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alho, C.J.R.; Schneider, M. & Vasconcellos, L.A. 2002. Degree of threat to the biological diversity in the Ilha Grande State Park (RJ) and guidelines for conservation. *Brazilian Journal of Biology*, 62: 375- 385.
- Antonini, R. D.; Nunes-Freitas, A. F. 2004. Estrutura populacional e distribuição espacial de *Miconia prasina* D.C. (Melastomataceae) em duas áreas de Floresta Atlântica na Ilha Grande, RJ, Sudeste do Brasil. *Acta bot. bras.* 18(3): 671-676.
- Carrivick, J. L.; Smith, M. W.; Quincey, D. J. 2016. *Structure from Motion in the Geosciences*. Londres, Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd.
- Cawood, A. J. 2017. LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models. Ed. 98. *Journal of Structural Geology*. P67-82.
- CEPED UFSC. (2. ed) 2013. *Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012*. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis. 126 p.
- Dantas, M. E.; Shinzato, E.; Medina, A. I. M.; Silva, C. R.; Pimentel, J.; Lumbreras, J. F.; Calderano, S. B.; Carvalho Filho, A.; Oliveira, R. P.; Mansur, K.; Ferreira, C. E. O. (2000). "Dignóstico Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro". Brasília: CPRM. (CD-ROM).

- Eirado Silva, L. G.; Heilbron, M. & Almeida, J. 2006. Os terrenos Tectônicos da Faixa Ribeira na Serra da Bocaina e na Baía da Ilha Grande, Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. 36: 426- 436.
- EMPRESA CHINESA – DJI. Disponível em: <<https://www.dji.com/br/mavic-pro-platinum>>, Acessado em: 20 de setembro, 2023.
- EM-DAT – Emergency Events Database. The OFDA/CRED International Disaster Database. Disponível em: <<https://www.emdat.be/>>. Acessado em: 13 de junho de 2023.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro-RJ). Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
- Furlan, M. C.; Lacruz, M. S. P.; Sausen, T. M. 2011. Vulnerabilidade socioeconômica à ocorrência de eventos extremos: proposta metodológica. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba. São José dos Campos: INPE. p. 4540-4546
- Gama, S. V. G.; Silva, L. G. A. E.; Salgado, C. M. 2009. "Geologia, Relevo e Solos." In: Bastos, M. P.; Callado, C. H. (eds.). *O ambiente da Ilha Grande*. Rio de Janeiro/Centro de Estudos Ambientais e Desenvolvimento Sustentável. p. 21-59.
- Guedes, E. 2007. *O enxame de diques da Serra do Mar na região entre Resende e a Baía de Ilha Grande, RJ*. Tese de Doutorado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Heilbron M., Pedrosa-Soares A.C., Campos Neto M., Silva L.C., Trouw R.A.J., Janasi V.C. 2004. A Província Mantiqueira. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves (eds.) *O Desvendar de um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Ed. Beca, cap. XIII, p. 203-234.
- INEA. Instituto Estadual do Ambiente. 2013. *Parque Estadual da Ilha Grande: plano de manejo (fase 2)/resumo executivo*./Instituto Estadual do Ambiente. Rio de Janeiro: INEA. 98p. il. Mapas
- Instituto Estadual do Ambiente (INEA). 2014. *Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: INEA. v.2, 120p.
- Koppen, W. 1948. *Climatologia: com um estudio de los climas de la tierra*. Publications In: *Climatology*. Laboratory of Climatology, New Gesey. 104p.
- Macedo, E. S.; SAandre, L. H. 2022. Mortes por deslizamentos no Brasil: 1988 a 2022. *Rev. Bra. de Geol. de Eng. e Amb.*, v.12, n.1, p.110-117.
- Marcelino, E. V.; Nunes, L. H.; Kobiyama, M. 2006. Banco de dados de desastres naturais: análise de dados globais e regionais. *Caminhos de Geografia*, v.6, n.19, p. 130-149.
- Mazzoni, R. & A.P.F. Silva. 2006. Aspectos da história de vida de *Bryconamericus microcephalus* (Miranda Ribeiro) (Characiformes, Characidae) de um riacho costeiro de Mata Atlântica, Ilha Grande, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, 23: 228-233
- Nimer, E. 1979. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 422 p. (Recursos naturais e meio ambiente).
- Rosa, R. 2011. *Geotecnologias na Geografia aplicada*. Revista do Departamento de Geografia, v. 16, p. 81-90.
- Santos, R. F. (2.ed) 2007. *Vulnerabilidade Ambiental: Desastres Naturais Ou Fenômenos Induzidos?*. Ministério do Meio Ambiente: [s. n.]. ISBN 978-85-7738

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE BAUXITA EM UMA REGIÃO AMAZÔNICA: UMA REVISÃO DA LITERATURA

ANALYSIS OF BAUXITE MINING WASTE CHARACTERISTICS IN AN AMAZONIAN REGION: A LITERATURE REVIEW

MATHEUS CAVALCANTE SILVA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, PA, Brasil, matheuscavalcante_s@hotmail.com

DÉBORA DIAS COSTA MOREIRA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Tucuruí, PA, Brasil, debora.dias@ufpa.br

JUNIOR HIROYUKI ISHIHARA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Tucuruí, PA, Brasil, jhi@ufpa.br

CHRISTIANE DO NASCIMENTO MONTE

Instituto de Engenharia e Geociências, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, PA, Brasil, christiane.monte@yahoo.com.br

JADELENE RAMOS DE SOUZA

Universidade Federal do Pará – UFPA, Tucuruí, PA, Brasil, jadelene.souza @tucurui.ufpa.br

ANA CRISTINA CAVALCANTE SELFE

Universidade Federal do Pará – UFPA, Tucuruí, PA, Brasil, ana.selfe@tucurui.ufpa.br

CARLOS DAVID VEIGA FRANÇA

Academia Maranhense de Ciências, Letras e Artes Militares, São Luís, Maranhão, Brasil, tutorveiga@gmail.com

RESUMO ABSTRACT

As atividades de mineração possuem grande relevância no cenário mundial, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico e na produção de bens e serviços. No Brasil, o estado do Pará tem recebido destaque, sobretudo pela produção, beneficiamento e comercialização de Bauxita. Não obstante, a demanda por tais insumos minerais acarretou no aumento da produção de rejeitos que, apesar de apresentarem métodos de disposição distintos, sempre representam riscos, os quais podem ser evidenciados nos últimos desastres envolvendo barragens de mineração sob jurisdição nacional. Posto isso, este estudo objetivou a discussão de métodos de beneficiamento de bauxita, variações granulométricas e mineralógicas e métodos de armazenamento de rejeitos em áreas estratégicas da Amazônia,

Mining activities have great relevance on the world stage, contributing to socioeconomic development and the production of goods and services. In Brazil, the state of Pará has received attention, especially for the production, processing and commercialization of Bauxite. However, the demand for such mineral inputs has led to an increase in the production of tailings which, despite having different disposal methods, always represent risks, which can be evidenced in the latest disasters involving mining dams under national jurisdiction. Thus, this study aimed to discuss bauxite processing methods, granulometric and mineralogical variations and tailings storage methods in strategic areas of the Amazon, aiming to support risk control actions in bauxite tailings disposal systems. To this end,

visando subsidiar ações de controle de riscos em sistemas de disposição de rejeitos de bauxita. Para tanto, o estudo constituiu uma revisão bibliográfica sistemática, priorizando os artigos mais relevantes e atuais sobre a temática, cujos descritores foram utilizados em base de dados confiável. Os resultados demonstraram que o beneficiamento do minério de bauxita necessita de dois processos para a transformação deste insumo em alumínio metálico; As variações granulométricas foram mais evidentes no município de Paragominas-PA, enquanto em Barcarena-PA houve predominância de silte; A mineralogia enfatizou maiores teores de hidróxidos de alumínio em Paragominas-PA em relação à Barcarena-PA; Os sistemas de armazenamento de rejeitos de bauxita em Paragominas-PA ainda são mais inseguros em relação aos aplicados em Barcarena-PA, que priorizam sistemas alternativos com maiores teores de sólidos e, conseqüentemente, facilitam as ações de controle.

Palavras-chaves - Beneficiamento mineral; Rejeitos de bauxita; Amazônia

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade econômica importante para o Brasil, e sua importância pode ser notada desde o período colonial, quando bandeirantes realizavam incursões em busca de metais preciosos, até os dias atuais, com avanços significativos na compreensão geológica, descobertas de depósitos minerais e melhorias nos processos industriais. Dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), apontam que o setor da indústria extrativa mineral, em 2017, representou 1,4% de todo o PIB brasileiro, sendo também uma importante fomentadora da indústria nacional, pois é o segmento fornecedor de matéria-prima para todos os tipos de indústrias existentes no país (IBRAM, 2019). Essa atividade tem sido um fator essencial para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, com destaque especial para os estados de Minas Gerais e Pará (IBRAM, 2016; ANM, 2021).

O estado do Pará possui grande potencial para se tornar um dos maiores centros mineradores mundiais, principalmente considerando que mais de 80% do total de exportações estaduais estão relacionadas às indústrias de mineração e de transformação mineral, que totalizam bilhões de reais (SIMINERAL, 2019), com destaque, dentre

the study constituted a systematic bibliographic review, prioritizing the most relevant and current articles on the topic, whose descriptors were used reliable database. The results demonstrated that the processing of bauxite ore requires two processes to transform this input into metallic aluminum; Granulometric variations were more evident in the municipality of Paragominas-PA, while in Barcarena-PA there was a predominance of silt; Mineralogy emphasized higher levels of aluminum hydroxides in Paragominas-PA compared to Barcarena-PA; The storage systems for bauxite tailings in Paragominas-PA are even more unsafe compared to those applied in Barcarena-PA, which prioritize alternative systems with higher solids contents and, consequently, facilitate control actions.

Keywords - Mineral processing; Bauxite tailings; Amazon

outras substâncias minerais, como principal estado nacional na produção bruta, beneficiada e comercializada de Alumínio (Bauxita) (ANM, 2022).

Contudo, as operações de mineração geram uma considerável quantidade de estéril e rejeito. Os mais volumosos entre eles são os decorrentes das fases de extração (chamados de estéreis) e do processo de beneficiamento (os rejeitos). Os procedimentos de beneficiamento de minério têm como objetivo principal extrair os elementos de valor econômico, ou seja, um produto final. Para Paixão e Wilken (2021), esses procedimentos envolvem a padronização do tamanho das partículas, a remoção de minerais que não têm valor econômico e o aprimoramento da qualidade, pureza ou concentração do produto final.

Segundo o Instituto de Pesquisa Avançada (IPEA, 2012), os métodos empregados variam amplamente, dependendo do tipo e qualidade do minério a ser extraído. A utilização frequente de água nos processos de beneficiamento, especialmente na concentração do minério, resulta na produção de rejeitos úmidos, e a gestão adequada e disposição desses rejeitos no ambiente representam desafios significativos para as empresas responsáveis. Esses resíduos podem ser arma-

zenados de diversas maneiras, incluindo cavas exauridas, minas subterrâneas, pilhas, depósitos ou barragens de rejeitos (MEDEIROS E LIMA, 2021). É importante notar que o armazenamento de rejeitos sempre carrega consigo riscos potenciais. Como exemplo desses riscos, cita-se um dos piores desastres relacionados a barragens de rejeitos de mineração, ocorrido no Brasil, em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) (NORONHA, 2021), esses eventos resultaram em extensos danos ambientais, impactos socioeconômicos significativos e perda de vidas humanas (SÁ *et al.*, 2021; QUEIROZ *et al.*, 2021; FELIZARDO *et al.*, 2021).

Os riscos de desastres no século XXI possuem causas complexas, perpassando por descaso técnico, que conduz à ruptura da barragem de rejeito, bem como pela modificação do ambiente, o uso dos recursos e dos territórios (NOGUEIRA E MOURA, 2022). Em resposta a esses incidentes, o governo tem agido através de medidas legislativas, com o propósito de estabelecer padrões de segurança destinados a reduzir a probabilidade de ocorrência de incidentes, acidentes ou desastres e atenuar seus efeitos, conforme exemplificado no Decreto nº 11.310/2022 (BRASIL, 2022).

Esta análise concentrou-se em dois municípios essenciais na região amazônica do Pará, a saber: Barcarena-PA e Paragominas-PA. A escolha dessas localidades se justifica devido à estreita relação entre elas nos processos de tratamento e armazenamento dos rejeitos de minério de bauxita. Paragominas-PA desempenha um papel crucial na mineração, abrigando a mina de bauxita da empresa Hydro, cujos minerais extraídos são triturados e transportados até Barcarena-PA (HYDRO, 2023a, b). Por sua vez, Barcarena-PA abriga um setor minero-metalúrgico significativo, com empresas renomadas como Alumínio Brasileiro S.A. (Albrás), Alumina do Norte do Brasil S.A. (Hydro Alunorte, a maior refinaria de alumina do mundo) e Alumínios de Barcarena S.A. (Alubar) (RODRIGUES *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2022).

Este estudo parte do pressuposto de que a ocorrência de desastres está, em grande parte, relacionada a deficiências no controle das estruturas de armazenamento de rejeitos de mineração, principalmente devido a lacunas no entendimento do comportamento desses rejeitos, para garantir a segurança durante toda sua vida útil e após seu fe-

chamento. Diante do exposto, esta análise objetiva realizar um levantamento de dados que visam identificar pesquisas que discutam: I) os métodos de tratamento de minérios de bauxita, II) características e variações sobre a granulometria e a mineralogia e III) métodos de disposição de rejeitos de bauxita em áreas estratégicas da região amazônica, visando sintetizar um arcabouço técnico-científico atual para subsidiar ações de gestão e controle de estruturas de contenção de rejeitos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Na etapa de revisão sistemática, foram pesquisados dados na plataforma *Scholar Google*, sendo considerados artigos de alta relevância científica, inseridos em periódicos revisados por pares e indexados, cujo recorte temporal correspondeu a um período de 10 anos (2014-2023). De modo complementar, foram considerados arquivos documentais clássicos e, secundariamente, também foram consideradas dissertações de mestrado e teses de doutorado.

Na estratégia de busca, foram utilizados os seguintes descritores isolados ou combinados, além de seus correspondentes na língua inglesa: Beneficiamento mineral/Mineral processing; Tratamento de minérios/Ore treatment; Beneficiamento de Bauxita/Bauxite processing; Rejeitos de mineração/Mining wastes; Características de rejeitos de mineração/Characteristics of mining wastes; Rejeitos de Bauxita/ Bauxite wastes; Granulometria de rejeitos de bauxita/Grain size of bauxite tailings; Mineralogia de rejeitos de bauxita; Armazenamento de resíduos de mineração/Mining waste storage; Armazenamento de rejeitos de mineração/Mining tailings storage; Barragens de rejeitos de mineração/ Mining tailings dams; Segurança de barragens/Dam safety.

Os documentos que não apresentaram o texto completo disponível e aqueles que não dispuseram relação com os objetivos propostos pelo estudo foram excluídos. Posteriormente, os estudos agrupados seguiram etapas de filtragem (Figura 1): 1 - Identificação; 2 - Seleção; 3 - Elegibilidade e 4 - Inclusão, tendo por base o modelo de Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA).

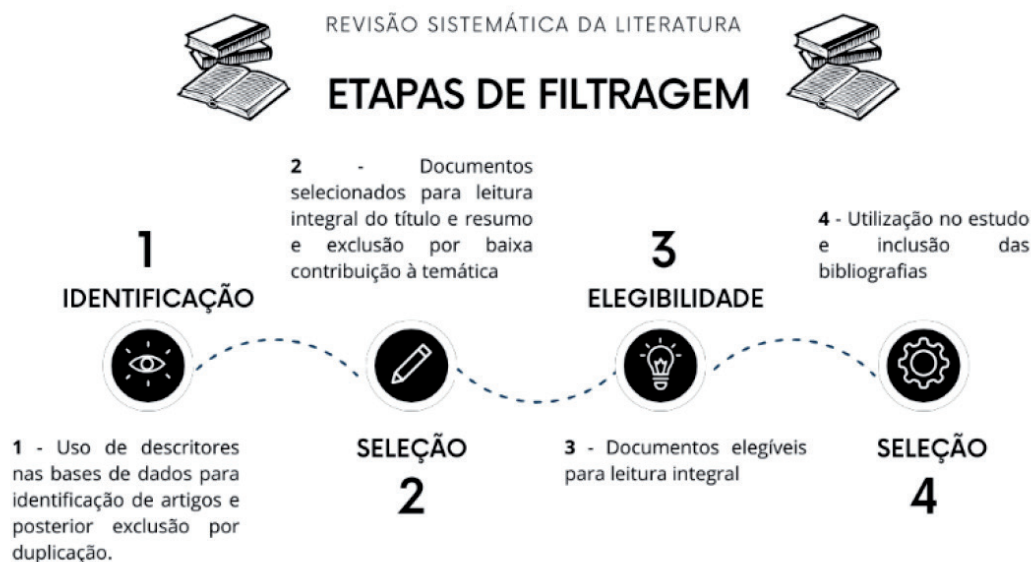


Figura 1. Infográfico representativo das etapas metodológicas seguidas para a revisão sistemática

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A maioria dos minérios naturais precisa passar por algum tipo de processo de melhoria de suas características físicas e químicas. Isso envolve separar os minerais valiosos daqueles que não têm valor econômico, de modo a obter uma parte que contenha a maior quantidade dos minerais valiosos (LUZ E LINS, 2018). Esse processo induz a separação de maneira seletiva e controlada, possibilitando a distinção do concentrado e do rejeito (THOMÉ E PASSINI, 2018). Duas etapas são as responsáveis pelos produtos gerados, a extração/lavra e o beneficiamento/concentração.

Segundo Souza, Moreira e Heineck (2018), a elevada produção de resíduos minerais provenientes do processo de beneficiamento de minério torna viável a construção de diques para dispor esse material, criando assim, as barragens de rejeitos. No entanto, quando construídas ou planejadas de maneira inadequada, essas estruturas

representam um grande risco para a sociedade, o meio ambiente e também a economia.

Nas operações de beneficiamento de minérios são gerados os estéreis e os rejeitos. De acordo com o IPEA (2012), os estéreis referem-se aos materiais escavados durante a extração da mina, não possuindo valor econômico, e geralmente são dispostos em pilhas. Por outro lado, os rejeitos são gerados a partir dos processos de beneficiamento aplicados às substâncias minerais. Os rejeitos não têm aplicação imediata, mas podem ser reutilizados na construção de barragens ou em sistemas alternativos para descarte de rejeitos, além de serem usados para preencher galerias subterrâneas. Somente em uma etapa posterior, é criado o que chamamos de “rejeito de minério” (Figura 2). Esse rejeito é formado principalmente por partículas muito pequenas resultantes do processo de beneficiamento mineral, como areia fina, silte e argila (IPEA, 2012).

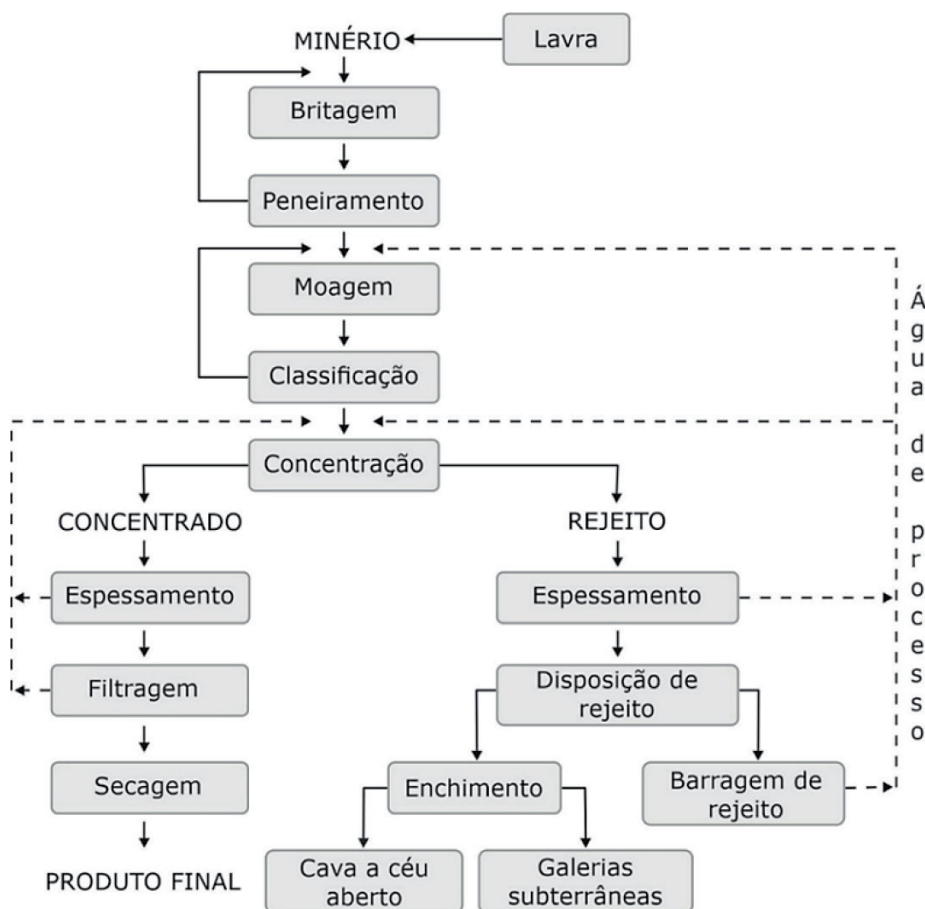


Figura 2. Diagrama representativo das etapas típicas do tratamento de minério

Fonte: Adaptado de Luz e Lins (2018).

É importante destacar que aproximadamente 85% da produção de bauxita é direcionada para a fabricação de alumina, um processo que envolve a lixiviação cáustica química úmida, conhecido como o processo Bayer (Figura 3). Posteriormente, a maior parte da alumina produzida por esse refinamento é utilizada como matéria-prima na

fabricação de alumínio metálico. Isso acontece por meio de um método que envolve a redução eletrolítica da alumina em um banho fundido contendo criolita, que pode ser de origem natural ou sintética (Na_3AlF_6). Esse processo é conhecido como o processo Hall-Héroult (USGS, 2019).

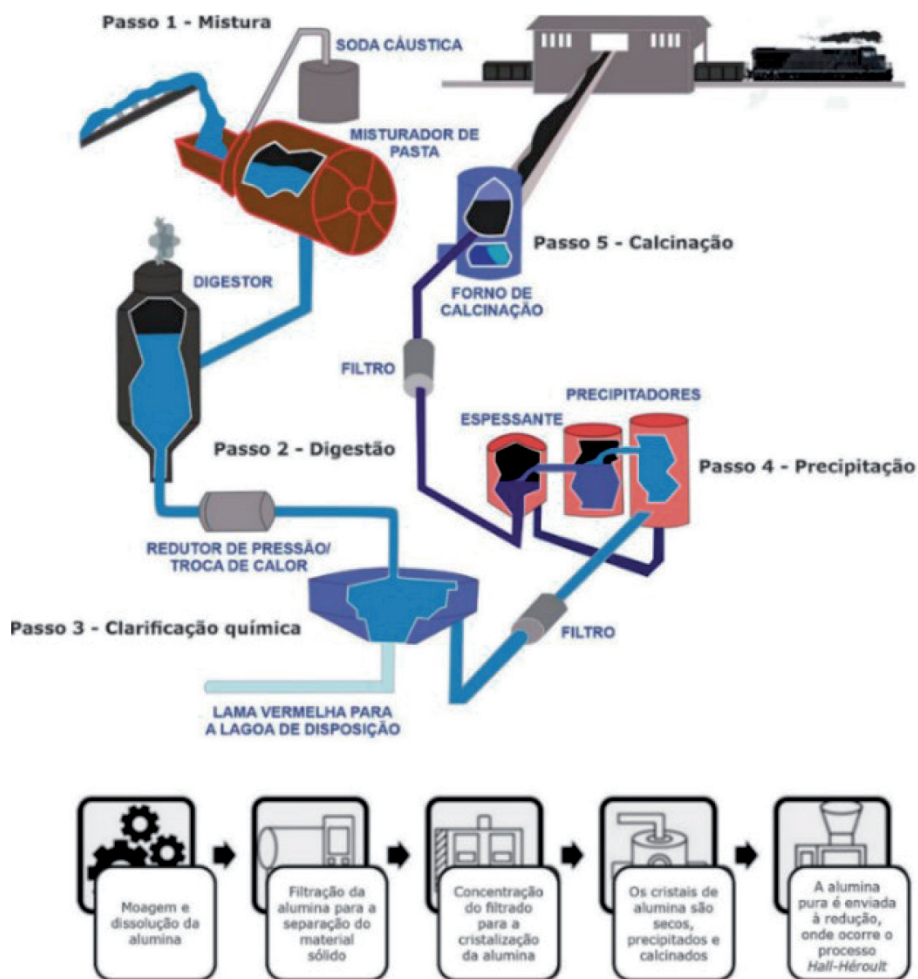


Figura 3. Diagrama simplificado de beneficiamento de caulim (via úmida)

Fonte: Adaptado de Tabereaux (2012); ABAL (2020).

O rejeito do minério de bauxita apresenta uma distribuição granulométrica totalmente dependente e relacionada com: a origem da rocha-mãe (a rocha exposta às intempéries da subsuperfície), ao processo de extração e beneficiamento do minério, ao processamento e ao modo de deposição e armazenamento (VILLAR, 2002). Em relação

a isso, Oboni e Oboni (2020) constataram a faixa de variação granulométrica, resumando um apanhado de ensaios de caracterização granulométrica realizados ao longo dos anos em rejeitos de bauxita de mineradoras distintas nos Estados Unidos (Figura 4).

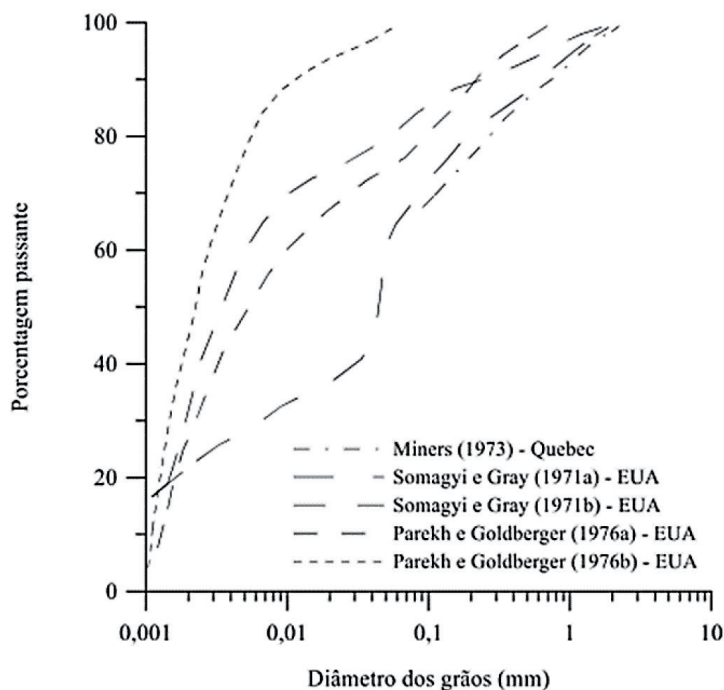


Figura 4. Variação granulométrica considerando distintos rejeitos de mineração de bauxita

Fonte: Oboni e Oboni (2020).

De acordo com essa faixa de variação, é possível constatar uma tendência na ocorrência de partículas majoritariamente com diâmetros de siltes, embora ainda seja possível verificar partículas do tamanho de argilas e areias finas em menor quantidade. Apesar disso, é válido ressaltar que a maioria dos estudos realizados em rejeitos de bauxita são direcionados a materiais geológicos submetidos ao processo Bayer, logo, ao considerar outros métodos existentes, a literatura ainda é incipiente (BRUSCHI, 2020).

De acordo com a classificação proposta por Oliveira e Rubio (2011), de uma forma geral, observamos que a polpa de bauxita contém partícu-

las de tamanho fino, com menos de 100 μm , sendo mais prevalentes na amostra de polpa. Além disso, há também partículas muito finas e ultrafinas, embora em menor quantidade. No entanto, é importante levar em conta que as condições climáticas, geológicas, pedológicas e regionais específicas da região amazônica exercem influência sobre as características das diferentes bauxitas que passam pelo processo de tratamento mineral, afetando a granulometria e a mineralogia de seus rejeitos. A tabela 1 apresenta alguns dos resultados encontrados em estudos realizados com bauxitas na região amazônica.

Tabela 1 - Variação granulométrica em rejeitos de bauxita da Amazônia

Autor (es)	Localidade	Faixa de variação
Reis (2015)	Paragominas - PA	50% das partículas é de aproximadamente 86 μm
Pinheiro <i>et al.</i> (2016)	Barcarena - PA	(Ponto 1: 98,47% < 100 μm) (Ponto 2: 94,57% < 100 μm)
Pinheiro <i>et al.</i> (2017)	Barcarena - PA	Predominância de partículas entre 2 e 60 μm (silte)
Santiago (2018)	Paragominas - PA	98% < 1 μm e 2% em torno de 0,6 μm
Rodrigues <i>et al.</i> (2019)	Paragominas - PA	90% < 500 μm e 10% < 5 μm
Santos <i>et al.</i> (2020)	Paragominas - PA	90% < 48,6 μm
Silva <i>et al.</i> (2020)	Barcarena - PA	90% < 22,5 μm 50% < 6,04 μm 10% < 1,65 μm
Araújo <i>et al.</i> (2020)	Barcarena - PA	80% < 38 μm

Em relação à mineralogia, de acordo com estudos de Sampaio *et al.* (2005), a bauxita é composta principalmente pela Gibbsita [$\text{Al}(\text{OH})_3$] e, dificilmente para climas tropicais, Boehmita [$\text{vAlO}(\text{OH})$] e/ou Diásporo [$\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$], apresentando como principais impurezas a Caulinita

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, óxi-hidróxidos de ferro, a exemplo da Hematita [Fe_2O_3] e Goethita [$\text{FeO}(\text{OH})$], além de óxidos de titânio (Rutilo e Anatásio - estrutura cristalina tetragonal) [TiO_2]. A Tabela 2 exhibe os resultados de análises mineralógicas realizadas em bauxitas da Amazônia.

Tabela 2 - Análises mineralógicas em rejeitos de bauxita da Amazônia

Autor (es)	Localidade	Resultados obtidos
Reis (2015)	Paragominas - PA	Gibbsita, Goethita, Caulinita, Hematita, Anatásio.
Pinheiro <i>et al.</i> (2016)	Barcarena - PA	Gibbsita, Hematita, Anatásio, Goethita, Sodalita e Quartzo.
Pinheiro <i>et al.</i> (2017)	Barcarena - PA	Hematita, Sodalita, Goethita, Gibbsita e Anatásio.
Santiago (2018)	Paragominas-PA	Gibbsita, Hematita, Quartzo, Anatásio e Caulinita.
Rodrigues <i>et al.</i> (2019)	Paragominas-PA	Gibbsita, Goethita, Hematita, Caulinita e Anatásio.
Melo <i>et al.</i> (2019)	Paragominas - PA	Gibbsita, Caulinita, Hematita, Goethita e Anatásio
Santos <i>et al.</i> (2020)	Paragominas - PA	Gibbsita, Caulinita, Goethita e Hematita
Silva <i>et al.</i> (2020)	Barcarena - PA	Hematita, Anatásio, Sodalita, Gibbsita, Quartzo, Goethita
Araújo <i>et al.</i> (2020)	Barcarena - PA	Hematita, Goethita, Gibbsita, Sodalita, Anatásio, Quartzo e Calcita

Uma grande preocupação em relação às indústrias minerais diz respeito à produção da elevada quantidade de rejeitos, os quais podem ser dispostos em diferentes tipos de estruturas (PAIXÃO, WILKEN, 2021; MEDEIROS E LIMA, 2021). A escolha do método de armazenamento depende de fatores como: a natureza do processo minerário, as condições geológicas e topográficas do local, as propriedades mecânicas dos materiais, o impacto ambiental dos contaminantes dos rejeitos e a climatologia da região (IBRAM, 2016).

De acordo com Thomé e Passini (2018), o método mais comumente aplicado para o armazenamento dos rejeitos da indústria mineral é a sua disposição em lagoas de decantação, que são represados por barragens de rejeitos. A Agência Nacional de Mineração (ANM), por meio da Resolução ANM nº 95/2022 (ANM, 2022), define as barragens de mineração, conceituando-as da seguinte maneira:

Art. 2º

IV – Barragem de Mineração:

a) barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais; b) estruturas construídas por meio de disposição hidráulica de rejeitos, como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, suscetíveis à liquefação (ANM, 2022, p. 2).

Além disso, a regulamentação também leva em conta dois critérios para determinar se uma barragem está sob a jurisdição nacional: o Critério de Risco (CRI) e o Dano Potencial Associado (DPA). O CRI é uma forma de classificar a barragem com base em fatores que possam afetar a probabilidade de ocorrência de acidentes ou desastres. Ele leva em consideração aspectos técnicos e outros elementos (ANM, 2022, p. 3). Por outro lado, o Dano Potencial Associado (DPA) se refere ao dano que poderia ocorrer devido a um rompimento, vazamento ou mau funcionamento

de uma barragem, independentemente de quão provável seja que isso aconteça. Esse dano pode ter diversos tipos de impactos (ANM, 2022, p. 4). De qualquer forma, ambos os critérios mencionados ajudam os empreendedores e as autoridades nacionais a determinar a frequência de monitoramento e, acima de tudo, a garantir a conformidade com as leis, regulamentos e padrões de segurança (ANM, 2022).

Sob outra perspectiva, os sistemas alternativos de disposição de sedimentos e rejeitos de mineração têm ocupado mais espaço no setor minerário e elucidam soluções para melhoria no nível de segurança estrutural, redução do potencial de dano ao meio ambiente e aplicação de soluções tecnológicas (GUEDES E SCHNEIDER, 2018). Nesse sentido, destaca-se o empilhamento a seco, ou *dry stacking/tailling dry backfill*, que consiste em um método responsável pelo empilhamento do rejeito de mineração após a separação do sólido da água, através de um sistema de filtragem, em uma pilha de rejeitos (OLIVEIRA-FILHO E ABRÃO, 2015). No Brasil, alguns empreendimentos já aplicam esse método, no qual o rejeito perpassa pelas seguintes etapas: desaguamento por peneiras de alta frequência e filtragem em filtro prensa horizontal ou outro tipo, resultando na produção de rejeitos com menor teor de umidade, o que possibilita seu empilhamento, evitando a necessidade da disposição em barragens (BRANDÃO, TOMI E SANTOS, 2016; BERGER, 2017).

Do ponto de vista estrutural, existem diferenças fundamentais entre as barragens de rejeitos da mineração e as pilhas de rejeitos. As barragens são projetadas para conter água e partículas sólidas, tanto em suspensão quanto em estado livre, resultantes do processamento do minério. A escala e o tamanho das barragens variam dependendo da topografia da região. Por outro lado, as pilhas de rejeitos podem ter diversas origens e formatos. Eles são delimitados por zonas de contenção ou localizados em áreas abertas. A forma como os rejeitos são tratados pode envolver a filtragem com posterior empilhamento, espessamento para a criação de uma pasta mais densa, ou até mesmo a co-disposição com o material estéril da mina. Isso pode ser realizado em cavas exauridas ou áreas de mineração já encerradas (STELA, DUARTE E PEREIRA, 2020).

No município de Paragominas-PA, a empresa Hydro realiza a disposição de rejeitos ainda em polpa, em quatro barragens de mineração devidamente cadastradas na Agência Nacional de

Mineração (ANM), sendo elas a B1, RP1, B6 e B5 (HYDRO, 2023c; ANM, 2023), cujas características encontram-se na tabela 3.

Tabela 3 - Características técnicas das barragens de mineração (Norsk Hydro, Paragominas-PA)

Barragem de mineração	Categoria de Risco - CRI	Dano Potencial Associado - DPA	Área do reservatório	Comprimento da crista
B1	Baixa	Alto	1.528.111,00m ²	1.580,00m
RP1	Baixa	Alto	3.063.663,00m ²	8.534,50m
B6	Baixa	Alto	402.289,00m ²	568,00m
B5	Baixa	Baixo	2.519.612,00m ²	1.359,00m

Fonte: ANM (2023).

Já em Barcarena-PA, a empresa Hydro utiliza a metodologia *tailing dry backfill* para realizar empilhamento de resíduos secos com 78% de teor de sólidos, permitindo o empilhamento a seco por

meio da disposição e compactação desses materiais (HYDRO, 2023d). Atualmente, o empreendimento possui dois Depósitos de Rejeitos (DRS-1 e DRS-2), conforme expõe a tabela 4.

Tabela 4 - Características técnicas dos Depósitos de Resíduos Sólidos (Norsk Hydro, Barcarena-PA)

Depósito	Capacidade de armazenamento	Volume armazenado	Altura da crista
DRS-1	51,70Mm ³	47,90Mm ³	Até 27m ^a
DRS-2	27Mm ³	0,6Mm ³	Até 80m ^b

^aConsiderando a estrutura com a maior elevação máxima (célula sul) dentre as outras (célula leste 1 - CL1, célula leste 2 - CL2, célula leste 3 - CL3, reservatórios, canais de contorno e outras).

^bConsiderando a estrutura com a maior elevação máxima (pilha de resíduo) dentre as outras (célula de emergência, bacias de controle, canal de controle interno, canal de controle externo, diques e fingers).

Fonte: HYDRO (2022a,b).

Apesar da disposição de rejeitos secos em pilhas ser mais eficiente e produtiva, tal como ocorre em Barcarena, Faria *et al.* (2021) atentam para o fato de que este método de disposição gera uma maior quantidade de volumes de rejeitos, que necessitam de uma destinação para se evitar seu acúmulo a longo prazo, necessitando a inerteização ou futuras atribuições. Ainda de acordo com estes autores, substâncias como o Alumínio (Bauxita) ainda são pouco aproveitadas na forma de rejeito, cuja justificativa pode estar atrelada a

questões econômicas, como valor agregado e o produto a ser beneficiado. Segundo Carmo, Lanchotti e Kamino (2021), ainda há relativa escassez sobre o aproveitamento de rejeitos minerais, o que pode dificultar a execução de projetos viáveis e aplicáveis.

Ainda assim, a disposição de rejeitos de bauxita permite um importante viés sustentável e em crescimento no setor da mineração nacional, sobretudo pelas diversas formas de aproveitamento em várias áreas e setores como, por exemplo, na

construção civil (cimento e materiais cerâmicos), na indústria química (catalisadores, reagentes fotodegradadores), na metalurgia (extração de óxidos para a produção de tintas, corantes, cosméticos), na indústria aeroespacial (ligas de titânio), na indústria nuclear (imobilizador de rejeitos nucleares), conforme enfatiza Shinomiya, Gomes e Alves (2019).

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, foram abordados aspectos cruciais relativos à gestão e ao controle das instalações de descarte e armazenamento de resíduos de mineração de bauxita. Exploramos temas como o processamento da bauxita, as variações em sua granulometria e mineralogia em regiões essenciais para o crescimento socioeconômico da Amazônia. Isso ganha maior relevância, considerando os recentes desastres em barragens de mineração no Brasil e as atuais mudanças na legislação visando a prevenção de tais acidentes.

O processo de beneficiamento da bauxita compreende duas etapas fundamentais: a primeira etapa converte a bauxita em alumina, seguindo o Processo Bayer, enquanto a segunda transforma a alumina em alumínio metálico, por meio do Processo Hall-Hérault.

A granulometria demonstrou ampla faixa de variação em Paragominas-PA, com variações de 90% entre $<48,6 \mu\text{m}$ e $<500 \mu\text{m}$, e uma ocorrência de 98% $< 1 \mu\text{m}$, indicando que tais intervalos permitem correspondem a grãos de distintos tamanhos, como argila, silte e areia. Já em Barcarena-PA, há uma predominância de partículas de silte, com baixas variações granulométricas, verificadas em 80% $<38 \mu\text{m}$ e 90% $<22,5 \mu\text{m}$.

A mineralogia em Paragominas-PA demonstrou-se amplamente uniforme, com predominância absoluta em Gibbsita e, secundariamente em Hematita, Goethita, Caulinita, Anatásio e Quartzo, evidenciando a predominância de hidróxidos de alumínio. Em Barcarena-PA, apesar de grandes variações quanto à predominância de alguns minerais, notou-se uma predominância de Hematita e, secundariamente, de Gibbsita, Sodalita, Anatásio, Goethita, Calcita e Quartzo o que permite inferir um teor muito maior de óxidos de ferro e

titânio em relação aos hidróxidos ricos em alumínio e silicatos.

Os métodos de disposição de rejeitos de mineração de bauxita em Paragominas possuem grande relação com o histórico método de contenção de rejeitos em forma de polpa em barragens de mineração e, apesar de apresentarem categoria de risco baixa, ainda requerem cuidados periódicos devido a altos danos potenciais associados em três delas. Por outro lado, a preocupação da empresa Norsk Hydro com o monitoramento de tais estruturas fica evidente ao considerar os altos investimentos para disposição de rejeitos de mineração filtrados, em pilhas, demonstrando aderência às formas alternativas e mais seguras de disposição de rejeitos da mineração, que podem ainda ser aproveitados futuramente.

Posto isso, enfatiza-se ainda, como sugestão aos estudos futuros, a necessidade de estudos de revisão que integralizem os conhecimentos desta análise ao comportamento geotécnico e geomecânico dos rejeitos de bauxita, considerando também as especificidades climáticas da região amazônica e suas peculiaridades pluviométricas, fazendo-se valer de medidas legislativas e embasamentos técnico-científicos, a fim de assegurar a segurança das estruturas de contenção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Pará - UFPA, ao Núcleo de Desenvolvimento da Amazônica em Engenharia - NDAE e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental - PEBGA, que possibilitaram a realização da presente pesquisa. Agradecem ainda ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação PIBIC - PRO-PESP/PIBIC, pela oportunidade de bolsa na categoria: PIBIC/UFPA - INTERIOR (edital nº 13/2023 - PROPESP) e à A Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP), em parceria com a Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA), pela concessão de bolsa na categoria Bolsas de Mestrado para Cursos Profissionais (edital nº 20/2023 - PROPESP/edital nº 005/2023 - FAPESPA).

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Mineração - ANM. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. 2021. Brasília - DF. Disponível Em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-contedo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb-2021-ano-base-2020.pdf>. Acesso em: 10 Jan. 2023.
- Agência Nacional de Mineração - ANM. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. 2022. Brasília-DF. Disponível Em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-contedo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/previaamb2022.pdf>. Acesso em: 25 Jun. 2023.
- Agência Nacional de Mineração - ANM. Resolução Nº 95, De 07 De Fevereiro De 2022. Consolida Os Atos Normativos Que Dispõem Sobre Segurança De Barragens De Mineração. Disponível Em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em: 16 De Jun. De 2023.
- Agência Nacional de Mineração - ANM. Sistema Integrado De Gestão De Barragens De Mineração - SIGBM. Disponível Em: <https://app.anm.gov.br/sigbm/publico/gerenciarpublico>. Acesso em: 20 De Fev. 2023.
- Araújo, P.F.M. et al. Bayer Process Towards the Circular Economy – Metal Recovery from Bauxite Residue. In: *Light Metals 2020*. In *Light Metals 2020* (P. 98-106). Springer, Cham., 2020.
- Associação Brasileira de Alumínio - ABAL. Trabalho da CBA de Restauração Florestal em Áreas Mineradas é Destaque Internacional. 2020. Disponível em: [Abal.Org.Br](http://abal.org.br). Acesso em: 10 Jan. 2020.
- Berger. K. C. Study of Tailings Management Technologies. Mine Environment Neutral Drainage (Mend) Project, 2017.
- Brandão, R.; Tomi, G. de; Santos, P. Iron Ore Tailings Dry Stacking in Pau Branco Mine, Brazil. *Integrative Medicine Research*, V. 5, N. 4, P. 339–344, 2016.
- Brasil. Decreto Nº 11.310, De 26 de Dezembro de 2022. Regulamenta dispositivos da Lei Nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010, Para Dispor Sobre as Atividades de Fiscalização e a Governança Federal da Política Nacional de Segurança de Barragens, Institui o Comitê Interministerial de Segurança de Barragens e altera o Decreto Nº 10.000, de 3 de Setembro de 2019. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.310-de-26-de-dezembro-de-2022-453739170>. Acesso em: 07 de Jan. de 2023.
- Bruschi, G.J. Estabilização de Rejeitos de Mineração de Bauxita por Meio de um Sistema Ligante Álcali-Ativado de Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar e Cal de Carbureto. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre – RS., 185p., 2020.
- Carmo, F.F., Lanchotti, A.O., Kamino, L.H.Y. Mining Waste Challenges: Environmental Risks of Gigatons of Mud, Dust and Sediment in Megadiverse Regions in Brazil. *Sustainability*, v. 12, n. 20, p. 8466, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/su12208466>.>. Acesso em: 12 mar. 2021
- Costa, I.J.L., Et Al. Atividade Portuária em Barcaena (Pará): Caracterização e Análise Ambiental de Seus Efeitos no Desenvolvimento Local da Vila de Itupanema. *Revista Brasileira de Geografia Física*, V.15, N. 03, P. 1639-1653, 2022.
- Faria, G. H. C., Teixeira, R. L. P., Shitsuka, R., Gouveia, L. L. A. Potencial de atuação da engenharia nos rejeitos sólidos de mineração no Brasil. *Revista de Casos e Consultoria*, 12(1), e24041-e24041, 2021.
- Felizardo, J. P. Et Al. Sources of Sedimentary Organic Matter And Assessment of Heavy-Metal Levels in Estuarine Sediments after Fundão Dam Breach. *Estuarine, Coastal And Shelf Science*, V. 261, P. 107507, 2021.

- Guedes, G. B.; Schneider, C. L. Disposição de Rejeitos de Mineração: as Opções Tecnológicas para a Redução dos Riscos em Barragens. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Rio de Janeiro – RJ., 28p., 2018.
- Hydro. Barragens. 2023c. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-br/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/paragominas/mineracao-paragominas/barragens/>. Acesso em: 25 Jun. 2023.
- Hydro. Depósitos de Resíduos Sólidos. 2023d. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-br/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/north-america/brasil/iptera/iptera/deposito-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 25 Jun. 2023.
- Hydro. Mineração Paragominas. 2023a. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-br/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/paragominas/mineracao-paragominas/>. Acesso em: 25 Jun. 2023.
- Hydro. Paragominas. 2023b. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-br/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/paragominas/>. Acesso em: 25 Jun. 2023.
- Hydro. Plano de Ação de Emergência (PAE) – Estruturas Geotécnicas do Depósito de Resíduos Sólidos 1 – Drs1. 2022a. Disponível em: <https://www.hydro.com/document/doc/pae%20drs%201.pdf?docid=583296>. Acesso em: 05 de Outubro de 2022.
- Hydro. Plano de Ação de Emergência (PAE) – Estruturas Geotécnicas do Depósito de Resíduos Sólidos 2 – Drs2 Fase 1. 2022b. Disponível em: <https://www.hydro.com/document/doc/pae%20drs%202.pdf?docid=583297>. Acesso em: 05 de Outubro de 2022.
- Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração. Brasília, P. 128. 2016. Acesso em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-E-Manejo-De-Rejeitos-Da-Mineracao-2016.pdf>. Acesso em: 25 Jun. 2023.
- Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. Relatório Anual Atividades - Julho 2018 a Junho 2019. 2019. Disponível: <https://ibram.org.br/relatorios-de-atividades/2018-2019.pdf>. Acesso em: 12/10/2023.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Brasília: IPEA, 2012. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/Rp_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf. Acesso em: 23 Set. 2022.
- Luz, A.B; Lins, F.F. Introdução ao Tratamento de Minérios. In: Luz, A.B.; Sampaio, J.A.; França, S.C.A (Org.). Tratamento de Minérios. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, 6ª Ed., V. 1, P. 3-6. Rio de Janeiro – RJ, 2018.
- Medeiros, L. T. B.; Lima, A. M. M. Método de Dimensionamento Espacial Aplicado para Vazamentos Hipotéticos de Depósitos de Rejeitos de Mineração. Research, Society And Development, V. 10, N. 9, P.11210917606 – 11210917606, 2021.
- Melo, C. C. A. et al. Gibbsite-Kaolinite Waste From Bauxite Beneficiation To Obtain Fauzeolite: Synthesis Optimization Using A Factorial Design Of Experiments And Response Surface Methodology. Applied Clay Science, V. 170, P. 125-134, 2019.
- Nogueira, F.R., Moura, R.B. Gestão de riscos e desastres: um campo de conhecimento em contínua evolução e a Geologia de Engenharia e Ambiental. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v.12, n.1, 2022.
- Noronha, F. D. L. Suscetibilidade geológica das barragens de mineração no estado de Minas Gerais: um panorama preliminar a partir de modelagem estatística e morfométrica. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v.11, n.2, 2021.
- Oboni, LF.; Oboni, C. Tailings Dam Management For The Twenty-First Century. Cham: Springer International Publishing, 2020.

- Oliveira, P.; Rubio, F. Mecanismos, Técnicas e Aplicações da Agregação no Tratamento Mineral e Ambiental. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Série Tecnologia Ambiental, 60. Rio De Janeiro – RJ., 69p., 2011.
- Oliveira-Filho, W. L.; Abrão, P. Disposição De Rejeitos De Mineração. Geotecnia Ambiental. Elsevier, Rio de Janeiro, 2015.
- Paixão, M. D.; Wilken, A. A. P. Alternativas de Disposição de Rejeitos de Mineração na Avaliação de Impacto Ambiental no Estado de Minas Gerais. Revista Geográfica Acadêmica, 15(1), P. 33-56, 2021.
- Pinheiro, E. R.; Fernandez, O. J. C.; Costa, J. C. Química-Mineral das Camadas Inertizadas em Lama Vermelha da Hydro Alunorte. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal – RN, 9p., 2016.
- Pinheiro, E. R.; Fernandez, O. J. C.; Costa, J. C.; Valente, E. M.; Carvalho, P. J. Variações Granulométricas, Mineralógicas e Alcalinas em Resíduos Inertizados da Hydro Alunort. Holos, Vol. 6, P. 50-59, 2017.
- Queiroz, H. M.; Ying, S. C.; Abernathy, M.; Barcellos, D.; Gabriel, F. A.; Otero, X. L.; Nóbrega, G.N.; Bernardino, A.F.; Ferreira, T. O. Manganese: The Overlooked Contaminant In The World Largest Mine Tailings Dam Collapse. Environment International, 146, 106284, 2021.
- Reis, I.N.S.F. Influência da Granulometria nas Propriedades Reológicas da Polpa de Bauxita Pós Beneficiamento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará. Belém – PA., 77p., 2015.
- Rodrigues, A.C.V.L.; Felipe, A.M.P.F.; Souza, J.A.S. Simulação de Condição de Fluxo em Duto Circular Transportando Polpa de Bauxita de Paragominas (PA) Na Presença de Aditivo Modificador de Viscosidade. Matéria (Rio de Janeiro), V. 24, P. 1-9, 2019.
- Rodrigues, J.C.; Hazeu, M.T.; Nascimento, S.M. Como se Produz Desastres?: O Processo de Licenciamento da Barragem de Rejeitos da Hydro Alunorte, em Barcarena, Pará. Nucleus, V. 16, N. 2, P. 151-159, 2019.
- Sá, F.; Longhini, C. M.; Costa, E. S.; Silva, C. A.; Cagnin, R. C.; G. L. E.O.; Lima, A.T.; Bernardino, A.F.; Neto, R. R. Time-Sequence Development of Metal (Loid) S Following The 2015 Dam Failure in the Doce River Estuary, Brazil. Science of the Total Environment, 769, 144532, 2021.
- Sampaio, J.A.; Andrade, M.C.; Dutra, A.J.B. Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Rio De Janeiro – RJ., P. 279-304, 2005.
- Santiago, E.N. Argamassas Cimentícias Mistas a Partir de Rejeitos de Beneficiamento da Bauxita da Amazônia. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Belém – PA. 81p., 2018.
- Santos, L.G.S.; Paz, S.P.A.; Cunha, E.J.S.; Souza, J.A.S. Non-Halogenated Flame-Retardant Additive From Amazon Mineral Waste. Journal of Materials Research And Technology, 9(5), P. 11531-11544, 2020.
- Shinomiya, L. D., Gomes, J. O., Alves, J. O. Análises de cenários para reaproveitamento do resíduo de bauxita no Pará. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, 16(1), 75-81, 2019.
- Silva, P. M. P.; Carmo, A. L. V. D.; Holanda, R. B.; Gomes, F. G.; Nogueira, E.; Costa, R. V. D.; Melo, C.C.A.; Lucheta, A.R.; Montini, M. Brazilian Bauxite Residue Physical-Chemical Characterization And Acidic Neutralization Potential. In Light Metals 2020 (P. 115-123). Springer, Cham., 2020.
- Sindicato das Indústrias Mineraias do Estado do Pará - SIMINERAL. 8º Anuário Mineral do Pará. 2019. Belém: Sindicato das Indústrias Mineraias do Estado do Pará. Acesso em: https://www.Simineral.Org.Br/Pdf/Anuarios/8-Mobile_Pt-Br.Pdf. Acesso em: 14 Jul. 2023.
- Souza Junior, Tennison Freire De; Moreira, Eclesielter Batista; Heineck, Karla Salvagni. Barragens

de Contenção de Rejeitos de Mineração no Brasil. *Holos [Recurso Eletrônico]*. Natal, RN. Vol. 5 (2018), P. 1-39, 2018.

Stela, L. H. P.; Duarte, J. C.; Pereira, C. O. Métodos de Disposição dos Rejeitos de Minério de Ferro Alternativos ao Método de Barragens: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Processos Químicos*, 1 (1), 1-58, 2020.

Tabereaux, A. The Discovery, Commercialization, And Development Of The Aluminum Industry In France. *Light Metal Age*, V. 70, N. 2, P. 28, 2012.

Thomé, R.; Passini, M. L. Barragens de Rejeitos de Mineração: Características do Método de Al-
teamento para Montante que Fundamentaram a

Suspensão de sua Utilização em Minas Gerais. *Ciências Sociais Aplicadas em Revista*, V. 18, N. 34, P. 49-65, 2018.

United States Geological Survey – USGS. Mineral Commodity Summaries. Reston, Virginia: 2019. Disponível em: https://D9-Wret.S3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/mcs2019_all.pdf. Acesso em: 28 de Setembro de 2022.

Villar, L. F. S. Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universitária Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 50p., 2002.

CONTRIBUIÇÃO E REFLEXÃO

A RBGEA abre esse espaço para que os membros de nossa comunidade tenham divulgados suas ideias, pensamentos e opiniões sobre temas e assuntos relacionados à Geologia de Engenharia e Ambiental.

Esperamos com estes textos iniciar debates e discussões e por isso questionamentos, perguntas, opiniões serão muito bem vindas.

CONVÊNIO CESP - OLADE

ASSISTÊNCIA TÉCNICA REFERENTE AOS TÚNEIS DO PROJETO ASTÚRIAS, NICARÁGUA - RELATÓRIO FINAL

1985

ALDÉRICO JOSÉ MARCHI
Engenheiro de Minas, EP/USP, 1979

JOÃO JERONIMO MONTICELLI
Géologo, IGc/USP, 1971, Mestre em Geotecnia, EESC/USP, 1984
Contato: abge@abge.org.br

1. INTRODUÇÃO

O artigo apresenta, na íntegra, e no formato original, o relatório inédito de assistência técnica de dois jovens profissionais da geotecnia brasileira ao Projeto Astúrias, Nicarágua, trabalho realizado no ano de 1985. Os autores, amigos de longa data, trabalharam no IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, depois na CESP- Companhia Energética de São Paulo e, por último, no Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá.

No Projeto Astúrias, um conjunto hidroelétrico de barragens e dois túneis de desvio, financiados por recursos do BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento, foram constados problemas e dificuldades técnicas e gerencias. A OLADE - Organização Latino-Americana de Desenvolvimento, interveniente no financiamento do projeto, solicitou assistência técnica da CESP - Companhia Energética de São Paulo no que se refere aos túneis e assuntos administrativos contratuais. O presente artigo diz respeito aos túneis.

A Nicarágua tinha passado por uma luta militar intensa, que culminou com a queda da ditadura, em 1979. Em 1985, por ocasião da viagem objeto desse relato, conflitos armados ainda aconteciam em muitas partes do país.

O interesse dos autores em submeter o presente artigo à RBGEA - Seção "Contribuições e Reflexões" -- se prende tanto ao momento técnico e histórico da época, como ao atual quadro político, com a deterioração das relações diplomáticas entre Brasil e Nicarágua, culminando com o rompimento das relações diplomáticas entre os dois países, em 2024.

Dentro desse contexto foi também escrito, no Posfácio, experiências pessoais vivenciadas pelos autores em seus trabalhos na Nicarágua. As fotos do Relatório e do Posfácio são de autoria de Aldérico José Marchi.

2. RELATÓRIO EM SUA ÍNTEGRA - TEXTO ORIGINAL DE 1985



*Companhia
Energética de
São Paulo*

CONVÊNIO CESP - OLADE
PROYECTO ASTÚRIAS - NICARÁGUA - CENTROAMERICA

ASSISTENCIA TECNICA REFERENTE A LOS TÚNELES
REPORTE FINAL

1985

Ing. Aldérico José Marchi
Geól. João Jerônimo Monticeli

CONVÊNIO CESP-OLADE
PROYECTO ASTÚRIAS - NICARAGUA -
CENTROAMERICA

ASSISTENCIA TECNICA REFERENTE A
LOS TÚNELES

Reporte Final

Ing. ALDÉRICO José Marchi
Geól. João JERÔNIMO Monticeli

São Paulo

• 1985

R - Vice-Presidência Divisional de Estudos e Desenvolvimento Energéticos
RP - Departamento de Projetos Especiais

M.O. 9.311.546

Av. Paulista, 1776 - 17º andar - São Paulo - S.P.

Tel. 284.0111 - R. 429

ADDR - Depósito Legal

São Paulo

1983

Este reporte contiene:

1. Carta de los técnicos de la CESP enviando las principales conclusiones de los trabajos efectuados.
2. Clasificación del macizo rocoso para abertura de los túneles, con las recomendaciones de los soportes y tratamientos mas adecuados, de acuerdo con los typos del macizo.
3. Anexo 1 : Informaciones técnicas sobre el "Nuevo Método Austriaco de Abertura de Túneles", coñocido como NATM.
Anexo 2 : Observaciones y recomendaciones sobre las excavaciones y voladuras, de manera de evitar sobre excavaciones y daños en el macizo rocoso.
Anexo 3 : Observaciones y recomendaciones sobre las investigaciones geológicas-geotécnicas de los túneles 1 y 2
Anexo 4 : Observaciones y recomendaciones sobre las construcciones de los túneles 1 y 2
Anexo 5 : Documentación fotográfica

São Paulo, 5 de noviembre de 1985

Ing. Marcio Nuñez
DD Secretario Ejecutivo de la
OLADE - Organización Latinoamericana de Energia

Distinguido Señor,

1. A través del télex No.135 del 16 de agosto de 1985, enviado por el Señor Ministro Director Emilio Rappaccioli al Doctor Marcio Nuñez; Secretario Ejecutivo de OLADE, fue solicitada una Asistencia Técnica de la CESP - Compañía Energética de São Paulo, para el Proyecto Asturias, en lo que se refiere a los túneles y a la administración del Proyecto.

2. Referente a los túneles fueron solicitados los siguientes trabajos:

- Interpretación de la geología de la zona donde se construirá el túnel. Se dispone de 8 perforaciones profundas a lo largo del eje y de un estudio geofísico de refracción sísmica.
- Preparación del informe que recomiende métodos de construcción adecuados para el tipo de obra y condiciones geológicas del área.
- Asesorar al personal nacional que supervisa la obra en tareas de inspección y control.

3. Para atender a esta solicitud, la Directoria de la CESP aprobó un viaje a Nicaragua, por 15 días, de el ingeniero Aldérico José Marchi y del geólogo João Jerônimo Monticeli. Los costos de este viaje estan siendo cubiertos por OLADE e INE.

4. Los técnicos de la CESP antes referidos fueron recibidos por los ingenieros Manuel Chávez y Jaime Parra, Gerente y Asistente de la Gerencia del Proyecto Asturias, respectivamente. Fueron efectuadas varias reuniones de trabajo y consultados documentos técnicos del Proyecto. En los días 9 y 15 de octubre fueron realizadas visitas técnicas a las obras de Asturias, ocasión en que hubo oportunidad de reuniones técnicas con los ingenieros de INE presentes en la obra, ingenieros Alejandro Morales, Ivan Ortega y Roy Mejía.

Las visitas a la obra contaron con la participación y colaboración del geólogo Noel Rodríguez Vilatta de GEOTECNIC, que muy gentilmente prestó varias informaciones al equipo de la CESP.

5. Conforme recomendaciones del ing. Manuel Chávez, la Consultoría de la CESP debería ser conducida, en lo que se refiere a los túneles, a informaciones prácticas de detalles. Procediendo de esta forma las informaciones básicas, sobre la Consultoría efectuada fue transmitida verbalmente en reuniones así también como en el campo y a través de reportes preliminares. El INE recibió textos en portugues (reportes preliminares) que abarcan los siguientes aspectos:

- Informaciones técnicas sobre el "Nuevo Método Austriaco de Abertura de Túneles", conocido como NATM.
- Observaciones y recomendaciones sobre las excavaciones y voladuras, de manera de evitar sobre excavaciones y daños en el macizo rocoso.
- Observaciones y recomendaciones sobre las investigaciones geológicas geotécnicas de los túneles 1 y 2.
- Observaciones y recomendaciones sobre las construcciones de los túneles 1 y 2.
- Clasificación del macizo rocoso para abertura de los túneles, con las reco-

recomendaciones de los soportes y tratamientos mas adecuados, de acuerdo con los tipos del macizo (texto en español).

6. Fueron también entregados al INE, nueve (9) publicaciones técnicas (en portugues) referente al estudio, diseño y construcción de túneles. Estas publicaciones son muy importantes, pues fue verificado que no existe disponibilidad de bibliografía para estudios.

7. Las observaciones básicas efectuadas por los técnicos de la CESP fueron las siguientes:

- Existen deficiencias en el conocimiento técnico por los equipos actuales de INE, Consultora (Shawinigan-Cañadá) y Constructora (ICA-México) para realizar los trabajos de abertura de los túneles.
- No hay diseño de detalles de los túneles y ninguna definición de los métodos constructivos. Las informaciones del diseño son generales y carecen de objetividad práctica.
- Como no existen diseños de detalles, también no hay previsiones sobre los equipamientos a utilizarse. Así también todos los otros parámetros utilizados, como costos, cronogramas etc. no son consistentes.
- Hay grandes posibilidades de ocurrir accidentes, caso no se indiquen nuevas direcciones para los trabajos.
- Las investigaciones geológicas-geotécnicas no estan suficientemente integradas y interpretadas, para poder subsidiar la elaboración de un diseño y para orientar la excavación y el tratamiento y soporte de los túneles.

8. Las principales recomendaciones son:

A. A corto plazo (inmediatamente)

- Interrumpir la excavación del túnel 1 y 2 y tomar las medidas de protección adecuadas en las partes ya excavadas, a través de la colocación de revestimientos provisionales o de la colocación de los revestimientos definitivos.
- Retomar la excavación a través del "Nuevo método austriaco de abertura de túneles (NATM)", utilizandose las recomendaciones de los reportes y las publicaciones entregadas al INE.
- Providenciar equipamientos completos para medidas de convergencia, para utilización durante la construcción de los túneles.
- Solicitar la presencia en la obra, de técnicos de la Consultora y Constructora con experiencia comprobada en construcción de los túneles usando el NATM.

B. A medio plazo (2 a 3 meses)

- Providenciar el diseño de detalle para la construcción de los túneles 1 e 2, segundo o NATM. Prover, junto con la Constructora, los equipamientos y materiales necesarios. Verificar, junto con la Consultora, la necesidad de concreto moldado como revestimiento definitivo, que podrá ser dispensable, en el caso que utilice el NATM.
- Verificar la posibilidad de una nueva Consultoría Técnica por parte de la CESP de por lo menos 3 meses. La Consultoría de la CESP podrá ser utilizada para la Construcción de Asturias y para la transferencia de tecnología en construcción de obras, principalmente referente a geología, geotecnia y mecanica de rocas.

9. Los costos concernientes a las recomendaciones anteriores significan muy poco en relación a los costos de las obras, al costo del contrato con la Consultora y también a las pérdidas materiales y humanas que podrán suceder caso ocurra un accidente. Para dar una idea de los precios, caso el INE necesite pagar toda la consultoría de dos técnicos brasileños durante tres meses, los costos serían del orden de U\$ 50.000.00, incluyendo costos de viajes y estadía y el equipo de medida de convergencia. Este costo es equivalente a construcción de cerca de 15 a 25 m de túnel.

10. Por último queremos resaltar nuestro agradecimiento a los ingenieros y funcionarios del INE, que nos atendieron y que muy gentilmente relataron sus experiencias de técnicos y ciudadanos de una nueva Nicaragua. Asimismo a la Señora Nubia Chávez, Secretaria de la Dirección del Proyecto Asturias por su fina atención y ajuda en la traducción de este reporte, que fue entregado al ingeniero Manoel Chávez, Gerente del Proyecto Asturias, el día 17/10/85 en una reunión técnica con el geólogo João Jerônimo Monticeli de la CESP.

Atenciosamente

ALDÉRICO JOSÉ MARCHI

Ingeniero en Minas

JOÃO JERÔNIMO MONTICELI

Geólogo

Anexos : Reportes mencionados anteriormente

PROYECTO ASTURIAS

CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA
ABERTURA DE LOS TÚNELES

PROYECTO ASTURIAS

CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA ABERTURA DE LOS TÚNELES1. Consideraciones previas

La clasificación elaborada considera, básicamente, las informaciones de los túneles ahora en construcción. Secundariamente fueron considerados los perfiles de sondeos, la sección sísmica preliminar y los afloramientos de roca en el área del Proyecto.

Procuramos establecer una clasificación simple, para uso inmediato en la obra. Y también, que posibilite la elaboración de secciones geológicas-geotécnicas a lo largo del trasado de túneles, de manera de elaborar un diseño antes de las excavaciones y de preverse el comportamiento de los materiales de la cobertura de los túneles.

2. Parámetros utilizados

Fueron considerados dos grupos de rocas, que parecen tener comportamientos geomecánicos distintos.

Grupo A: Tobas y brechas tobáceas.

Grupo B: Andesitas, ignimbritas, brechas ignimbriticas, basaltos y diabásas.

Los parámetros utilizados son:

Grupo A: Coerencia, fracturamiento y presencia de agua

Grupo B: Alteración y fracturamiento.

Estos parámetros fueron utilizados por ser los más simples de verificación, por permitir estimar las cualidades geomecánicas del macizo, también, por ser posible de ser establecidos en sondeos.

Los símbolos C1, C2, ... A1, A2, ... etc. pueden ser utilizados en perfiles de sondeos y en mapeamientos. Así también las clases de macizo I, II, ... etc. De esta manera las interpretaciones geológicas y el uso de estas en los diseños y construcción serán facilitadas.

Los parámetros utilizados están descritos en las tablas 1 a 3.

3. Clasificación del macizo rocoso

Clasificar un macizo rocoso significa elegir los parámetros mas representativos de un macizo y establecer las clases, graduando de la más favorable a la más desfavorable.

La clasificación es realizada despues de haber sido efectuada la caracterización geológica-geotécnica del macizo rocoso. Por caracterización debe ser entendido el acto de levantar informaciones sobre el macizo, a través de mapeamientos, sondeos, ensayos "in situ", ensayos sobre cuerpos de prueba, etc.

CARACTERIZACIÓN → CLASIFICACION → USO EN EL DISEÑO

En el caso de los túneles del Proyecto Asturias la clasificación prevé, en primer lugar, separar los tipos de roca, conforme mostrado en la tabla 4. Por ejemplo, caso sea una Toba es utilizada la tabla 4.a. En seguida es verificada la coherencia. Caso sea coherencia C3 es necesario verificar la presencia de água, siendo que estando seco sería H1 y, por tanto, el macizo es IV*.

El macizo IV* es el local donde predomina Toba frágil, o sea, que está seca y se quiebra facilmente con las manos.

Por otro lado, un macizo III puede ser de Toba o de otras rocas (andesita, por ejemplo) y es apreciada como un material resistente, muy fracturado (6 a 20 fracturas por metro).

De acuerdo con estas clases de macizos y siguiendo los procedimientos del NATM fueron establecidos los tipos de tratamiento, que estamos presentando en la Tabla 5.

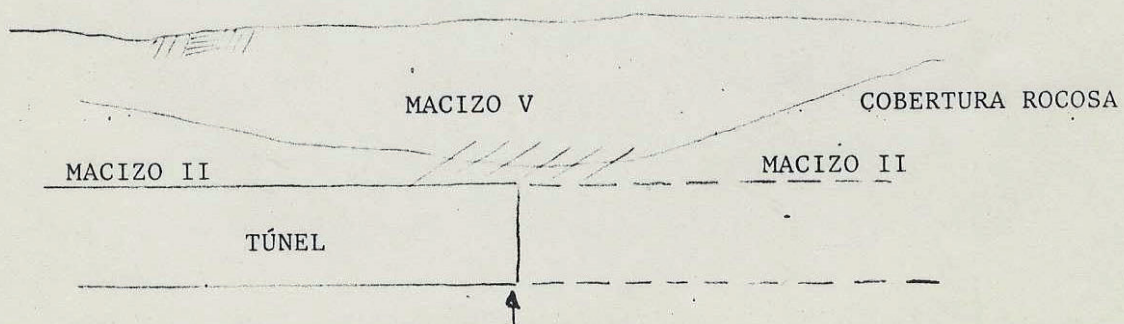
Es importante recordar que es comun la necesidad de adaptación y continuo perfeccionamiento de la clasificación y de los tratamientos por hora establecidos.

4. Observaciones importantes

La clasificación propuesta deberá ser establecida en cada frente de trabajo a través de un mapeamiento sistemático, a ser efectuado por técnicos y profesionales suficientemente entrenados para ésto.

Es necesario también realizar una clasificación del macizo antes de la abertura del túnel, o sea, utilizando las secciones topográficas, los sondeos, los levantamientos geológicos de superficie (mapeamiento) y la sísmica recientemente realizada. Este trabajo permitirá visualizar el comportamiento de la cobertura rocosa, pues es muy importante saber el tipo de macizo rocoso que existe en la parte superior del túnel (cobertura del túnel) y la existencia de discontinuidades (fallas, contactos, etc.).

En caso de existir una cobertura de mala calidad y la existencia de discontinuidade, mismo que la excavación indique macizo de buenas condiciones, es necesario medidas de seguridad y tratamientos mas conservadores. A veces es necesario recurrir a consolidación del macizo por inyección de cemento.



Necesidad de cuidados con la excavación, pues puede ocurrir colapso en la bóveda. Disminuir el avance.

En el caso de los túneles del Proyecto Asturias la clasificación prevé, en primer lugar, separar los tipos de roca, conforme mostrado en la tabla 4. Por ejemplo, caso sea una Toba es utilizada la tabla 4.a. En seguida es verificada la coherencia. Caso sea coherencia C3 es necesario verificar la presencia de agua, siendo que estando seco sería H1 y, por tanto, el macizo es IV*.

El macizo IV* es el local donde predomina Toba frágil, o sea, que está seca y se quiebra facilmente con las manos.

Por otro lado, un macizo III puede ser de Toba o de otras rocas (andesita, por ejemplo) y es apreciada como un material resistente, muy fracturado (6 a 20 fracturas por metro).

De acuerdo con estas clases de macizos y siguiendo los procedimientos del NATM fueron establecidos los tipos de tratamiento, que estamos presentando en la Tabla 5.

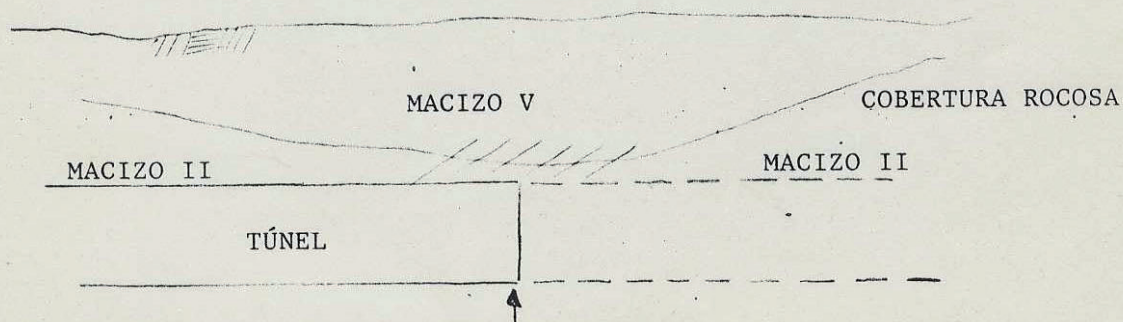
Es importante recordar que es comun la necesidad de adaptación y continuo perfeccionamiento de la clasificación y de los tratamientos por hora establecidos.

4. Observaciones importantes

La clasificación propuesta deberá ser establecida en cada frente de trabajo a través de un mapeamiento sistemático, a ser efectuado por técnicos y profesionales suficientemente entrenados para esto.

Es necesario también realizar una clasificación del macizo antes de la abertura del túnel, o sea, utilizando las secciones topográficas, los sondeos, los levantamientos geológicos de superficie (mapeamiento) y la sísmica recientemente realizada. Este trabajo permitirá visualizar el comportamiento de la cobertura rocosa, pues es muy importante saber el tipo de macizo rocoso que existe en la parte superior del túnel (cobertura del túnel) y la existencia de discontinuidades (fallas, contactos, etc.).

En caso de existir una cobertura de mala calidad y la existencia de discontinuidade, mismo que la excavación indique macizo de buenas condiciones, es necesario medidas de seguridad y tratamientos mas conservadores. A veces es necesario recurrir a consolidación del macizo por inyección de cemento.



Necesidad de cuidados con la excavación, pues puede ocurrir colapso en la bóveda. Disminuir el avance.

Tabla 1. Parámetros para clasificación de Tobas y Brechas Tobáceas

A) Coherencia

<u>Indice</u>	<u>Descripción</u>
C-1	<u>Resistente</u> . No se puede quebrar con las manos, a no ser pequeños fragmentos y pequeñas laminas.
C-2	<u>Resistencia intermedia</u> a las presiones de las manos. Con esfuerzo es posible quebrar los fragmentos.
C-3	<u>Frágil</u> . Se quebra facilmente con las manos. Aspecto de un suelo compacto o consolidado. Es excavado con martillo.

B) Presencia de agua

<u>Indice</u>	<u>Descripción</u>
H-1	Seco.
H-2	Paredes húmedas o escurrimiento de agua en las paredes.
H-3	Caída continua de agua (Caudal).

Tabla 2. Fracturamiento (para usar en todas las rocas)

<u>Indice</u>	<u>Fracturas/Metro</u>	<u>Espaciamientos/ Centímetro</u>	<u>Descripción</u>
F-1	< 2	> 50	Macizo poco fracturado; o mejor.
F-2	2 a 5	entre 50 y 20	Medianamente fracturado.
F-3	6 a 20	entre 20 y 5	Muy fracturado.
F-4	> 20	< 5	Extremamente fracturado.

Tabla 3. Alteración (solamente para el grupo B: andesitas, etc.)

<u>Índice</u>		<u>Descripción</u>
A-1	<u>Prácticamente sana</u>	Los minerales se presentan sin alteración química o ésta es de poca intensidad. Las fracturas pueden estar oxidadas y levemente alteradas. Difícil de quebrar con el martillo. No se puede quebrar con las manos.
A-2	<u>Medianamente alterada</u>	Los minerales presentan alteración química, lo que resulta en una descoloración original de la roca. La resistencia es menor que la anterior, mas es una roca de buenas cualidades mecánicas. Apenas pequeñas lascas y pequeños fragmentos pueden ser quebrados con las manos. Al impacto del martillo es mas fácil de quebrar que la roca anterior. Puede ser llamada de <u>roca alterada dura</u> .
A-3	<u>Alterada</u>	Los minerales se encuentran totalmente alterados. La roca pierde parte del color original. Los fragmentos pequeños pueden ser quebrados con las manos. Fácil de quebrar con el martillo, pudiendo desintegrarse totalmente a un impacto mas fuerte. Puede ser llamada de <u>roca alterada suave</u> . Puede incluir <u>suelo residual</u> o de alteración.

TABLA 4

Tabla 4A. Tobas y Brechas Tobaceas

<u>Parámetros de verificación</u>		<u>Clase de Macizo</u>
C3	H2/H3	V
C3/C2	H1	IV*
C1	F4 { H2/H3	V
		H1
C1/C2	F3	III
	F2	II
	F1	I

Tabla 4B. Otros tipos de rocas: andesitas, ignimbritas, brechas-ignimbriticas, basaltos, diabasas

<u>Parámetros de verificación</u>		<u>Clase de Macizo</u>
A3		V
A3/A2		
	F4	IV
A1	F3	III
A1/A2	F2	II
	F1	I

PROYECTO ASTURIAS - CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA LOS TÚNELES

Tabla 5. Correlación: Clases de Macizo - Tratamiento

(REVISION 1)

Clase de Macizo	Litología	Avance (Metros)	Tratamiento
I	(todas)	2 a 3	Torcreto de 5 cm
II			Torcreto de 5 cm y pernos
III			Pernos sistemáticos separados a cada 1,5 x 1,5 m y torcreto de 10 cm aplicado em dos etapas de 5 cm.
IV*	Solamente tobacias y brechas tobáceas	1.5 a 2.5	Torcreto de 10 cm aplicado em dos etapas de 5 cm. En caso necesario usar tela metálica.
IV	(Todas)	1.2 a 2.0	Pernos sistemáticos separados a cada 1,5 x 1,5 m, tela metálica y torcreto de 10 cm (idem). En caso necesario, utilizar marcos (arcos metálicos).
V			Marcos separados de 0,50 a 1,20 m y torcreto de 10 cm (idem). Importantemente la fijación de los marcos con pernos (3 a 4) y el torcreto con espesor suficiente para consolidar el marco en el macizo. Excavación con rompedores.
Regiones Anomalias			Necesidades de estudiar caso a caso.

- OBSERVACIONES:
1. Base del túnel: Concreto moldado.
 2. Como las tobacias y brechas tobáceas se alteran en contacto con agua es necesario tratamiento inmediato y cuidado con el revestimiento definitivo. Como estas rocas y otras pueden tener deformaciones excesivas puede haber necesidad de apuntalamientos especiales.
 3. En caso de dificultades constructivas pronunciadas debido a bajas cualidades de macizo (clase V o IV) podrá haber necesidad de utilizar las técnicas de consolidación previa con inyección de cemento y pernos de aceros y las demás medidas conocidas para los tratamientos.
 4. En caso de ocurrir caudal de agua (H3) será necesario drenaje a través de drenos verticales y sub-verticales de 10 a 15 m de profundidad o menos.

ANEXO I

NATM - NUEVO MÉTODO AUSTRIACO PARA ABERTURA DE TÚNELES

ANEXO I

NATM - NUEVO METODO AUSTRIACO PARA ABERTURA DE TUNELES

Este método de abertura de túneles se basa en el principio de relajamiento controlado para conseguir un equilibrio estable en las excavaciones subterráneas. De esta forma el macizo rocoso se deforma aliviando las tensiones y estabilizandose gracias al sistema de apuntalamiento.

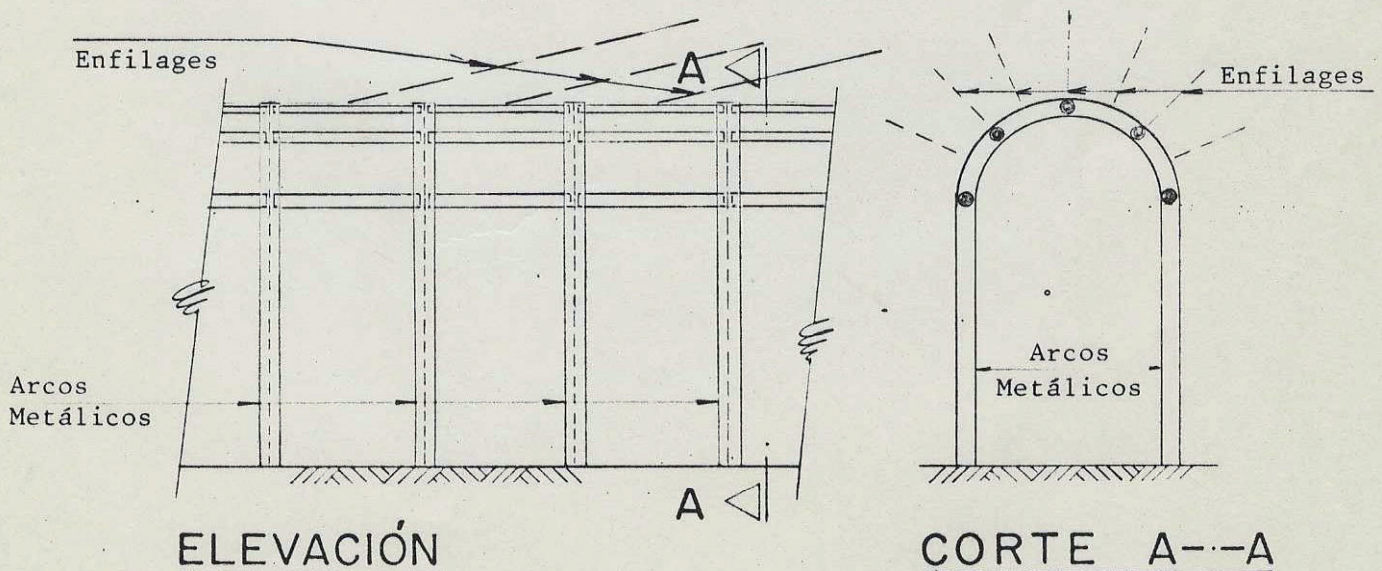
Este sistema (aconsejado) por el NATM es en orden decreciente de importancia: Tirantes e pernos, torcreto, con o sin tela metálica y arcos metálicos (perfiles metálicos = marcos).

La función de los tirantes o pernos es la de producir la formación de un arco de reacción al rededor de la excavación, es decir un acoplamiento entre los bloques que forman la abobeda y la pared. Es por eso que deve ser aplicado al mismo tiempo que se comienza la abertura para prevenir el "desajuste" del arco.

El torcreto también funciona impidiendo el inicio de un proceso de ruptura previniendo las deformaciones iniciales excesivas, funcionando también (de forma limitada) como elemento estructural, principalmente si se lo utiliza con tela metálica lo que le confiere resistencia a la tracción.

Los arcos metálicos son usados específicamente en zonas donde hay peligro de desprendimientos del cielo raso encima de los obreros e equipos. Generalmente son utilizados con otro sistema de apuntalamiento para garantizar su línea de contacto y la distribución de la carga en la superficie del túnel, es decir, el torcreto.

Estos arcos metálicos son usados en lugares inestables y zonas donde se sea necesario además de los arcos y tirantes, tratamientos especiales como enfilages (vea figura abajo).



El NATM indica:

- a) apuntalamiento, o tratamiento inmediato después de la excavación, para poder controlar la disgregación del macizo.
- b) Control de las deformaciones para la verificación de la adaptación de las estructuras estabilizantes y la necesidad de revestimientos definitivos. Este control se realiza con medidas de convergencias en secciones transversales al túnel, secciones éstas que son instaladas seguidamente a la excavación. Dependiendo del lugar, puede haber necesidad de una instrumentación mas completa (extensómetros, inclinómetros, células de carga, etc.)

Para decidirse por el apuntalamiento/tratamiento se procede a elaborar una clasificación geológico-geotécnica del macizo rocoso. Esta clasificación se realiza en todas las etapas del proyecto. En la etapa de estudio, la clasificación se basea en el mapeamiento geológico-geotécnico, en los sondeos, ensayos "in situ" y las muestras e investigaciones geofísicas.

Esta clasificación junto con las medidas de soporte aconsejadas, sirven para estimar el costo de la obra, la elaboración de los proyectos y los materiales y equipos que seran necesarios.

Sólo en la etapa de construcción es quando se realiza el proyecto ejecutivo de un túnel. En este caso la clasificación del macizo rocoso es nuevamente realizada, ahora a partir del mapeamento sistemático de las frentes de excavación.

Es importante mencionar que los estudios de estabilidad de túneles se dividen en 2 corrientes. Una mas teórica, usa modelos matemáticos y simplificaciones para el macizo rocoso. La segunda, mas práctica que es el NATM, en la cual la estabilidad es verificada através de la instrumentación del túnel. Destacamos que ésta última, es actualmente la más utilizada en todo el mundo, presentando la ventaja de indicar durante la construcción del túnel los parámetros que permiten comprobar la estabilidad de las excavaciones.

Con las informaciones obtenidas por la instrumentación es posible mejorar el revestimiento definitivo, lo que generalmente conduce a una disminución importante en el costo final de la obra.

Existe una amplia bibliografía sobre el NATM, siendo que algunas publicaciones brasileñas estan anexadas a este trabajo.

ANEXO 2

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE LAS
EXCAVACIONES Y VOLADURAS

ANEXO 2 - EXCAVACIONES

I. TUNEL

La sobre excavación de un túnel, normalmente es de responsabilidad de la contratista (constructora). La propietaria en este caso deve imponerle severas multas. Una super excavación de 30 a 40% puede duplicar o hasta triplicar el volumen de hormigón moldado en el caso de que éste sea utilizado. En algunos casos se vuelve totalmente imposible su aplicación o se arriesga la estabilidad del túnel.

La solución del problema de la sobre excavación puede y tiene que ser resuelta durante el desenvolvimiento del túnel, haciendose modificaciones en la distribución de los agujeros. Debe tenerse en cuenta que sobre excavación casi siempre significa exceso de carga, principalmente si la sobre excavación es sistemática. Pueden efectuarse algunas experiencias como por ejemplo disminuir las cargas en los agujeros periféricos, disminuir las cargas en todos los agujeros, cambiar la geometría del fuego, realizar agujeros periféricos sin carga en el plano de fuego, etc.

II. TALUDES

En este caso el pré corte del talud final es utilizado de forma sistemática, para evitar la sobre excavación y estabilizar el macizo sobrante.

III. FUNDACIONES

En este caso, cerca de la etapa final de las excavaciones el desmonte debe ser cuidadoso, para evitar afectar por demas el macizo (provocando fracturas).

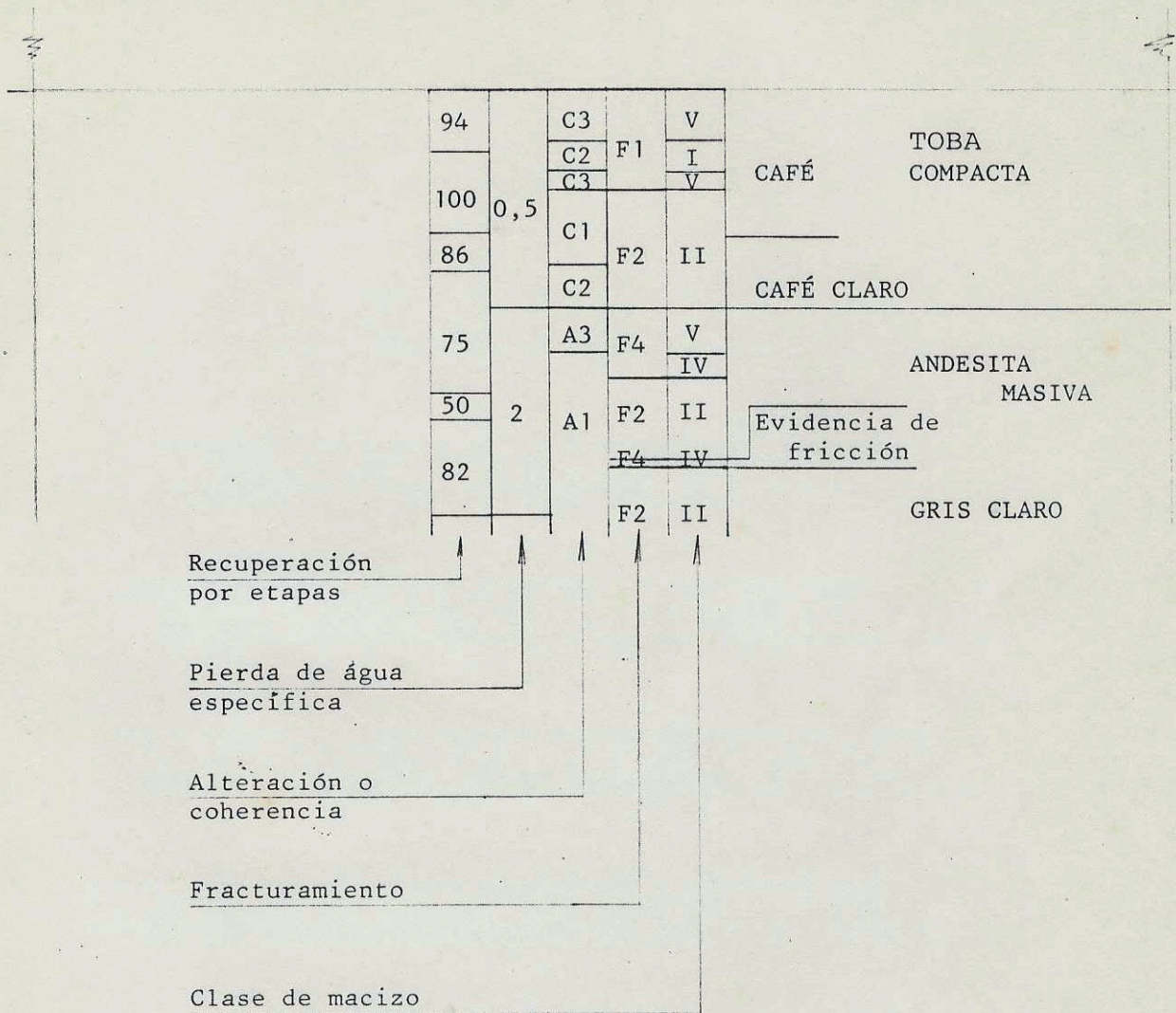
ANEXO 3

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE LAS
INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS-GEOTÉCNICAS
DE LOS TÚNELES 1 E 2

ANEXO 3

**OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE LAS INVESTIGACIONES
GEOLOGICAS-GEOTECNICAS DE LOS TUNELES 1 Y 2 DEL PROYECTO ASTURIAS**

1. Para la etapa de viabilidad, las investigaciones de campo fueron insuficientes. Lamentablemente esta etapa es la que puede llegar a influenciar en las decisiones y en el costo de las obras. Esta etapa fue relegada también a segundo plano en muchas partes del mundo, principalmente en lo que se refiere a trabajos de campo.
2. Los perfiles de sondas son insuficientes y la forma de presentación de los resultados debe ser mas simple y directa.
3. No hay un trabajo de síntesis que agrupe todas las informaciones del tipo geológica-geotécnica de la obra y que brinde una interpretación para su utilización en el proyecto y en las construcciones.
4. Aparentemente se pasó de la etapa de viabilidad para la del proyecto ejecutivo sin tener el necesario conocimiento de las condiciones geológico-geotécnicas y de sus influencias en el proyecto y en el costo de la obra.
5. La ejecución del estudio de levantamientos sísmicos no puede ser separada de un análisis conjunto con las otras investigaciones realizadas como sondeos, mapeamientos y ensayos. La sísmica es una herramienta de trabajo para ser usada en conjunto con otros datos, siendo necesario su integración.
6. La integración de las informaciones geológico-geotécnicas debe ser llevada a cabo lo mas rápido posible. Se sugieren los siguientes trabajos:
 - 1) Describir nuevamente los sondeos y presentar los perfiles de forma mas objetiva, tratando usar una fácil descripción que sea comprensible para los interesados, es decir, propietaria de la obra, proyectista y constructora. Para esto es importante incluir en los perfiles la clasificación del macizo rocoso y los parámetros utilizados para su constitución. Presentamos abajo un ejemplo que podrá ser adaptado al perfil existente. Debe recordarse que para cada obra es necesario establecer un tipo de perfil que mejor atienda a las necesidades del proyecto.



La pérdida de agua específica es un valor que comunmente es utilizado para describir las condiciones de permeabilidad. Para sondeos con diametro NX (76 mm) e trechos de 3 metros de ensayo el valor de pérdida de água específica igual a 1 equivale a cerca de 10^{-4} cm/s. Para otros valores es solo efectuar la correspondencia directa. La pérdida de água específica (símbolo PE) es expresada por:

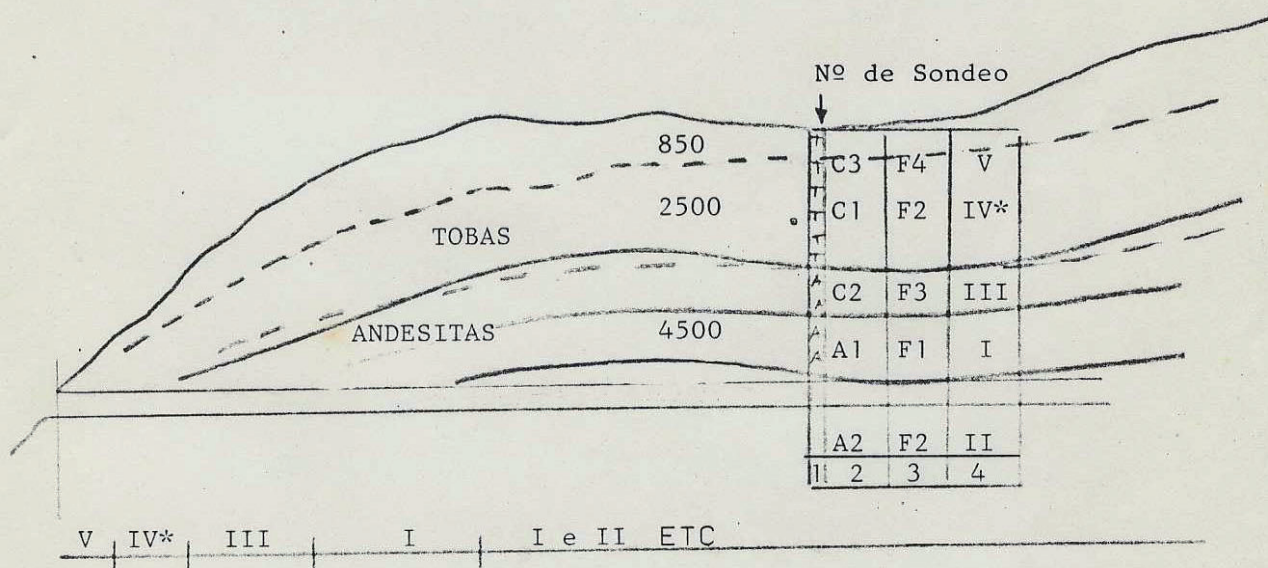
$$PE = \frac{\text{Pérdida absorbida em litros por minuto}}{\text{Trecho ensayado em metros x presión efectiva em Kg/cm}^2} =$$

$$= 1/\text{min/m/kg/cm}^2$$

CORRELACION BASICA: $11/\text{min}/\text{m}/\text{kg}/\text{cm}^2 = 10^{-4} \text{ cm/s}$
 VALIDO PARA:sondeos NX y trecho de ensayo de 3 m.

2) Dibujar una sección geológico-geotécnica longitudinal a los túneles, integrando todos los datos existentes y realmente importantes para el proyecto. No es necesario incluir informaciones demas, pero sí datos objetivos como tipo de roca, alteración/coherencia, y fracturamientos.

Presentamos abajo un ejemplo. Lo importante seria trazar los contactos de los tipos de macizos rocosos para permitir quantificar el proceso constructivo.



MACIZO ROCOSO
(Estimativa)

1. Litologia
 2. Alteración/coherencia
 3. Fracturamiento
 4. Tipo de Macizo
- . Extractos Sísmicos
 . Contacto Litológico
 850 . Veloc. sísmica en m/s
 . Tipo de Macizo

Los levantamientos sísmicos clasifican los siguientes extractos:

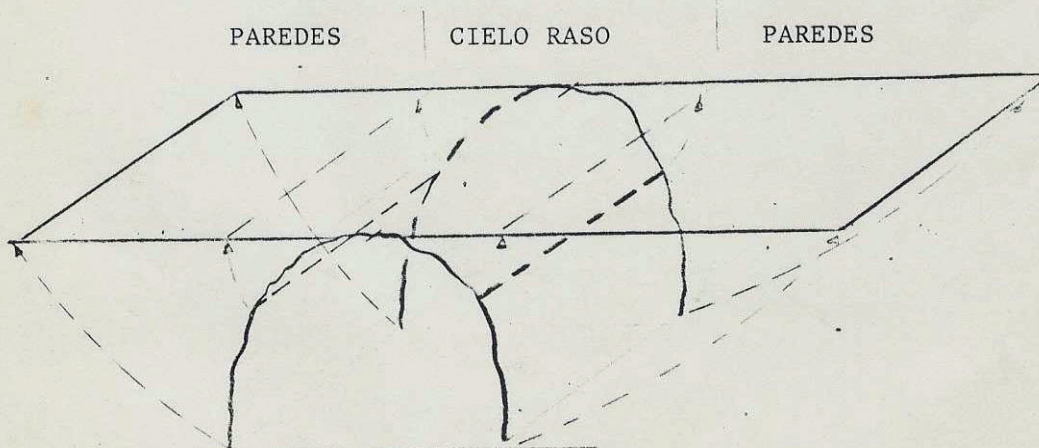
< 600 m/s	Suelos poco consolidados	excavable
600 a 1100 m/s	Suelos compactos	escarificables
1100 a 2000 m/s	Roca alterada o friable	
	Roca extremadamente fracturada	escarificable
2000 a 3500 m/s	Rocha con vários grados de alteración/coherencia y con fracturaciones menos significativas que la anterior	solo escarificable em algunas condiciones
> 3500	Macizo rocoso poco fracturado practicamente sano	solo desmontable con explosivos

Es importante recordar que la sísmica no puede identificar capas frágiles recubiertas por capas de roca de mayor resistencia.

- 3) El programa de sondeos escogido parece estar correcto. Se hace necesario ejecutar los sondeos igualmente en los trechos de macizos de buena calidad para su correcta clasificación. Algunas veces es necesario realizar los sondeos durante la etapa de construcción, para tener una mejor previsión del comportamiento del macizo, para confirmar las hipótesis de trabajo y no solo desenhar sobre conjeturas.

Para el dimensionamiento del revestimiento provisório de los túneles es necesario un mapeamiento sistemático de las frentes de excavación y clasificación del macizo rocoso. Por su importancia y por los cuidados que requiere su ejecución, recomiendanse los siguientes procedimientos:

- 1) Realizar el rebajamiento de las paredes laterales y del cielo raso para un mismo plano.



- 2) Mapear todas las características geológicas y geotécnicas importantes y efectuar la separación de las clases de macizos rocosos. Anotar las salidas de água.
- 3) Para una correcta obtención de los datos es preciso:
 - . iluminar el túnel
 - . controlar la localización, a través de marcas de pintura en las paredes.
 - . control topográfico.
- 4) Dejar libre la excavación y la colocación del revestimiento provisório después de analizado el mapamiento.
- 8) Como el mapeamento está hecho sistemáticamente después de cada desmonte, es necesario disponer de un equipo en la obra para realizar este trabajo.

ANEXO 4

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE LAS CONSTRUCCIONES

DE LOS TÚNELES 1 E 2

ANEXO 4

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE LA CONSTRUCCION
DE LOS TUNELES 1 Y 2 DEL PROYECTO ASTURIAS

1. El método constructivo no está definido y prácticamente no existe proyecto. Parece que se trata de una utilización errónea del NATM.
2. No existe aplicación de pernos ni siquiera donde ellos son reconocidamente el mejor método de estabilización, por ejemplo en rocas fracturadas. Es importante indicar que en el NATM el apuntalamiento a través de anclajes es una necesidad básica.
3. Ni la anclaje ni el torcreto están siendo aplicados enseguida después del desmonte (voladura). Esto produce el completo relajamiento y pérdida de la capacidad de auto soporte del túnel, pudiendo ocasionar gastos extras con el revestimiento definitivo y también provocar accidentes.
4. El torcreto no está sujeto a control de calidad, ni de aplicación (se observan capas con espesores inferiores a 1 cm).
5. Existe una pérdida excesiva del torcreto (50%). La contratista deberá ser responsabilizada.
6. Aparentemente el tiempo de que tarda en secar el torcreto es muy elevado. Es necesario certificarse.
7. Los arcos metálicos instalados en el túnel 1 no están solidarios con la pared del túnel, esto demuestra que los mismos no están funcionando.
8. Podría reducirse el espesor del alma de los perfiles de los arcos metálicos en por lo menos 1" sin perjudicar sensiblemente su capacidad de soporte, disminuyendo su costo y facilitando su empleo.
9. El sistema de ventilación del túnel 1 está muy alejado del frente, de esa forma no se consigue realizar la purificación de los gases ocasionados en el área de desmonte.
- 10 Durante el desarrollo del túnel se recomienda la previsión de construcción de "nichos" para permitir el desvío de las vagonetas y el estacionamiento de equipos de "torcreto", agilizando las operaciones de limpieza y aplicación del torcreto.
- 11 Sería aconsejable que el INE realice un cálculo de los costos directos e indirectos de un posible accidente que pudiera ocurrir en los túneles 1 y 2: atraso de 3 a 6 meses del cronograma, accidentes con obreros y necesidad de equipos y estructuras adicionales de soporte.
- 12 Se observó que no existe una previsión, ni siquiera inicial del material necesario para construir el túnel. Esto se debe a no existir un proyecto preliminar (proyecto básico para la excavación).

- 13 No se está efectuando mapeamento geológico-geotécnico de las paredes del túnel, lo que conducirá una incorrecta correlación con la instrumentación y podrá traer mayores dificultades durante la vida útil de la obra, por la inexistencia de un registro de como era a roca del lugar ("as built").
- 14 La cantidad de obreros de los equipos no es la adecuada, perjudicando por consiguiente la productividad. Parece exagerado tener 8 obreros solamente para la perforación, siendo necesario mejorar todo el sistema de producción: perforación, colocación de explosivos, limpieza, equipo de mantenimiento general, etc.
- 15 No estan siendo efectuadas las medidas de convergencias y por eso no se sabe cuanto se está deformando el macizo. Se corre el riesgo de accidentes y no se poseen informaciones para el proyecto del revestimiento definitivo.
- 16 Las medidas de protección indicadas por el NATM, como los arcos metálicos, pernos, torcreto y tela metálica, si fuesen aplicados en los túneles del Proyecto Asturias podrian constituir el revestimiento definitivo, sin necesidad de hormigón moldado extra. Sin embargo, en este caso será necesario: a) medidas de convergencia e b) estudio hidráulico que lleve en cuenta las condiciones de erodibilidad, rugosidad de las paredes, velocidad del agua, permeabilidad y resistencia del torcreto.
- 17 El proyecto indica retirar el revestimiento provisório para entonces aplicar el revestimiento definitivo. Ademas de no estar utilizando del revestimiento provisório, de forma de reduzir el costo de revestimiento definitivo, habrá aumento de costos y problemas de inestabilidad de las paredes del tunel, provocando nuevamente sobre excavación y peligro de accidentes.

ANEXO 5

DOCUMENTACIÓN FOTOGRÁFICA



Foto 1 - Embocadura del túnel 1, en andesitas fracturadas. Las fotos 2, 3 y 4 fueron hechas en las excavaciones para la embocadura.



Foto 2 - Andesita : > 20 fracturas/m : F4; practicamente sana : A1 clase IV



Foto 3 - Andesita
(20 a 10 fracturas/m → F3; praticamente sana → A1 : clase III)



Foto 4 - Andesita: praticamente sana
Trecho de < 5 fracturás/m : clase II
Trecho de 6 a 20 fracturas/m : clase III

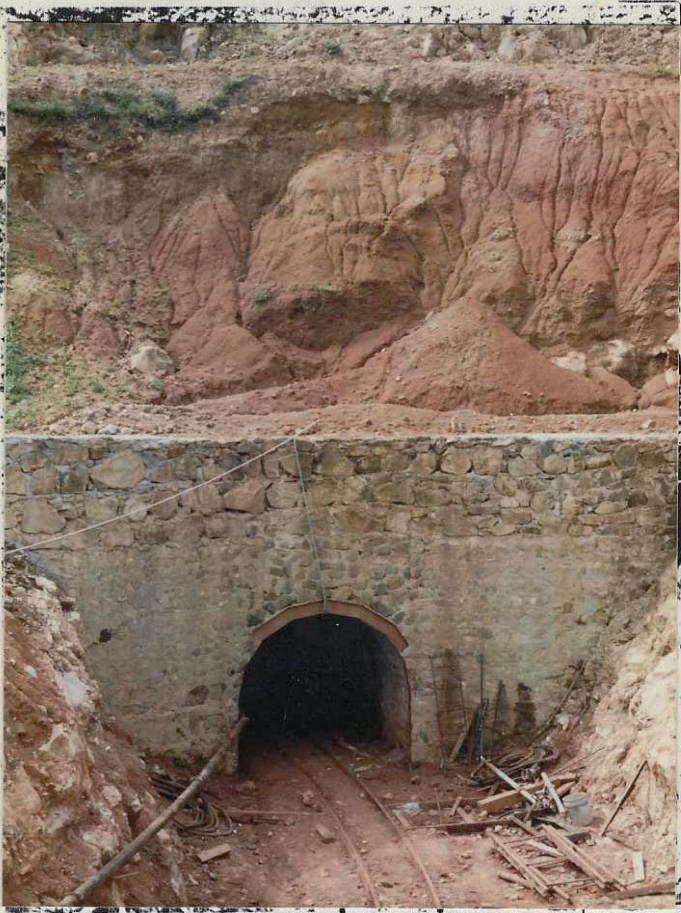


Foto 5 - Embocadura del túnel 2, en brechas tobáceas. La foto 6 fue hecha en la pared derecha de la excavación para la construcción de la embocadura.



Foto 6 - Brecha tobácea (trechos friables/C3 y trechos de resistencia intermedia/C2, seca/H1, no se observa la presencia de fracturas: clase IV*)



Foto 7 - Tobas

Facilmente disgregável com presença de água. Observar torcreto de 1 cm para a proteção de las paredes contra la intempérie.

Trechos friáveis/C3 y trechos de resistencia intermedia/C2; seca/H1; no se observa la presencia de fracturas: clase IV*.

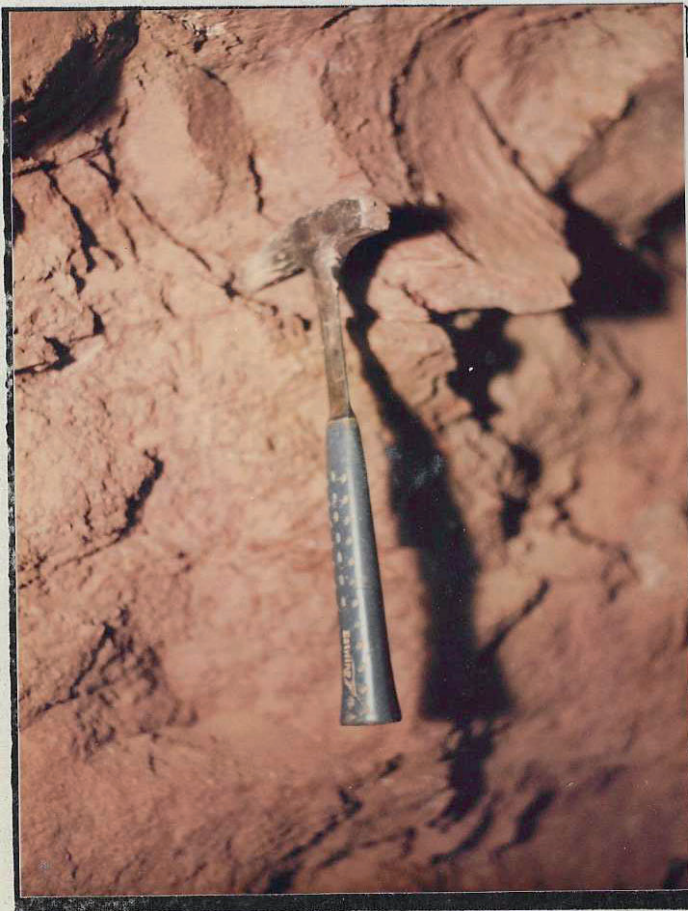


Foto 8 - Tobas. Superficialmente en forma de lodo. (con la presencia de água: clase V)



Foto 9 - Arco metálico no consolidado a las paredes del túnel.

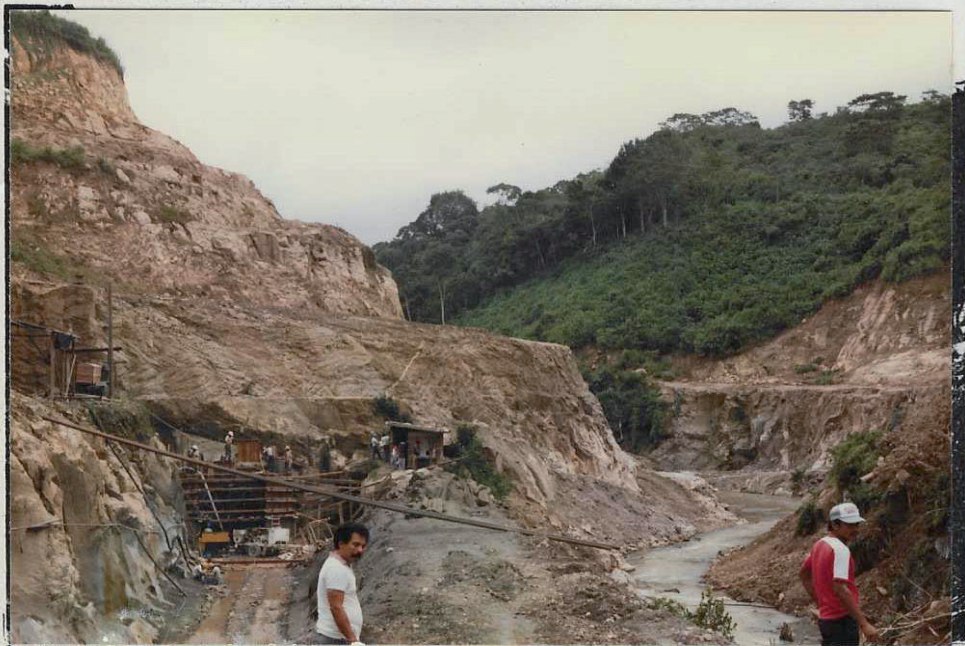


Foto 10 - Hombreira izquierda. Nivel inferior (ignimbritos y andesitas); nivel intermediario (andesitas y tobas) y nivel superior (tobas).

Observar embocadura del túnel de desvío en ignimbritos



Foto 11 - Eje de la presa y hombrera derecha.



Foto 12 - Detalle del nivel inferior de la hombrera izquierda en andesita y ignimbritos practicamente sanas.

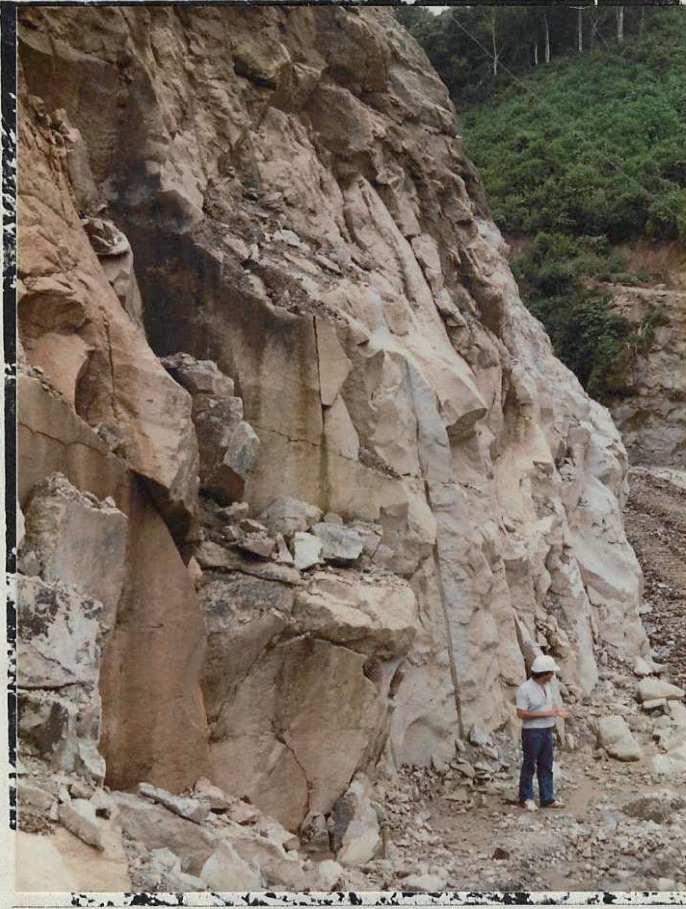


Foto 13 - Hombrera izquierda. Nivel inferior. Superficie final de corte a fuego en igninbrito y andesita.

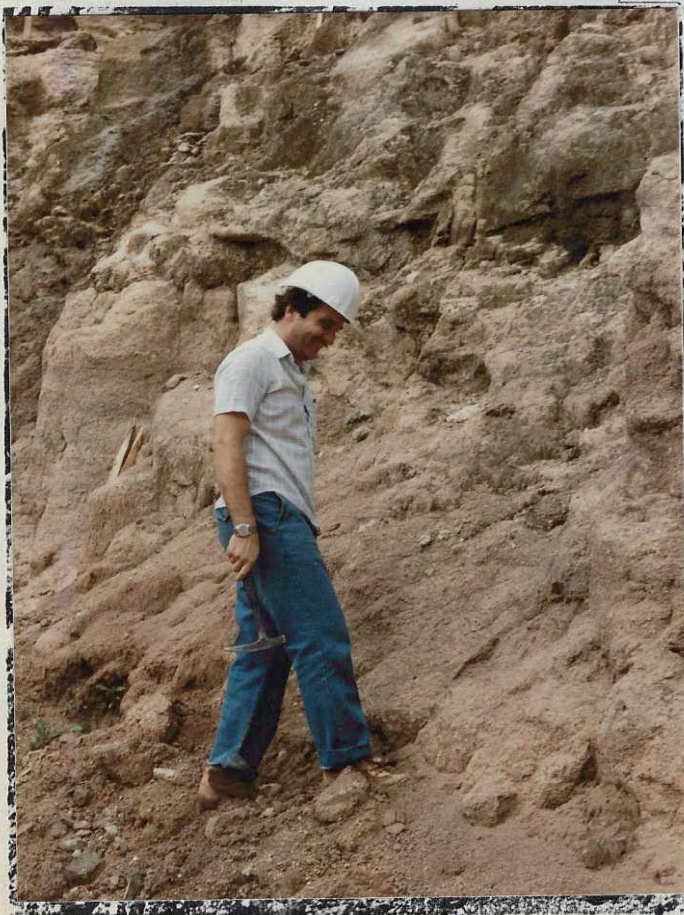


Foto 14 - Hombrera izquierda. Nivel intermediario. Superficie de tobas desagregadas por causa de la intemperie.

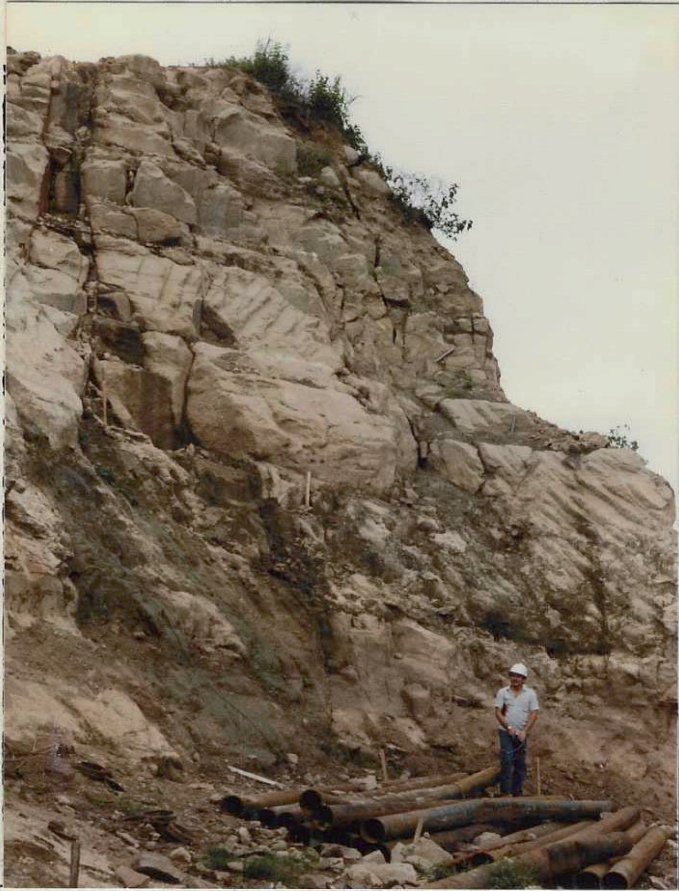


Foto 15 - Hombrera izquierda, nivel intermediario. Observar el bloque inestable. Tobs resistente (C1) o resistencia intermediaria (C2) con trechos muy fracturados (F3) y medianamente fracturados (F2).

Observar la presencia de humedad en las fracturas principales y el efecto de desagregación superficial.

**PROYECTO ASTURIAS
SENTAS DE LAS PUBLICACIONES ANEXADAS**

- 1) Jornal da ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - Nº 34.
- 2) Propostas para admissão de sócio - ABGE
- 3) Lista de publicações da ABGE
- 4) Reporte Nº 19 173 do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de título: Uma propostas de sistemática de estudos geológicos-geotécnicos para projetos de túneis - 132 páginas.
- 5) Publicação: Metodologia para a caracterização geotécnica de maciços basálticos em túneis viários - 12 páginas.
- 6) Publicação: A importância do acompanhamento técnico em escavações subterrâneas - 10 páginas.
- 7) Publicação: Estudo comparativo entre as fases do projeto interligação Jaguari-Cachoeira - 16 páginas.
- 8) Tese de Mestrado do geól. Luiz M. Ojima: Metodologia de classificação de maciços rochosos aplicável a túneis - 104 páginas.
- 9) Tese de mestrado do geól. João J. Monticelli: Influências da compartimentação geológico-geotécnica de maciços rochosos no projeto de fundações de barragens - Fase de Viabilidade - 149 páginas.
- 10) Publicação ABGE - Tradução Nº 8: Princípios e modos de aplicação do novo método austríaco de abertura de túneis com atenção particular às condições geotécnicas e topográficas brasileiras - 35 páginas.
- 11) Publicação ABGE - Tradução Nº 10: Sustentação e revestimento em túneis e galerias - 31 páginas.
- 12) Publicação ABGE - Anais do Simpósio sobre escavações subterrâneas. Volume 1 - 736 páginas e Volume 2 - 451 páginas.

3. POSFÁCIO

3.1 Viagem São Paulo-Quito-Panamá-Manágua e retorno

Na ida, houve necessidade de permanência por três noites em Quito, aguardando a regularização de uma greve da companhia aérea. Os dois dias de folga foram aproveitados para visitar as regiões de vulcanismo ativo próximas a Quito e o monumento que identifica a Linha do Equador (Fotos 1 e 2). A altitude de Quito provocou mal-estar em um dos viajantes (Geól. João Jeronimo).

Nas viagens de retorno os autores, separadamente, (o Eng. Aldérico teve de antecipar o retorno), aproveitaram a escala do voo e o tempo em terra para visita de algumas horas a um trecho do célebre Canal do Panamá.

O Eng. Aldérico procurou contratar um taxista para um passeio pela cidade do Panamá. O

taxista perguntou se havia um local de interesse específico, recebendo a resposta óbvia: “o Canal”. O motorista então retrucou: “*tu piensas que Panamá es sólo el Canal?* Quando ouviu de resposta “*muy bien*, me leva para conhecer a Base Militar Norteamericana” o motorista enfurecido o abandonou e o visitante teve de procurar outro taxi.

A esposa do Eng. Aldérico ligava regularmente para saber a data do retorno do marido, em decorrência de gravidez avançada. (Não havia internet e nem celular). Em um dos cafés da manhã, os colegas conversam sobre a noite mal dormida. O Eng. Aldérico então comenta que teve um sonho esquisito: sonhou que estava conversando em portunhol com alguém ao telefone, alguém que dizia para ele voltar logo, pois o parto da esposa iria se adiantar. O Geól. João Jeronimo responde: “meu amigo, você deve ter sonhado alto pra burro, pois eu escutei todo o seu sonho”.

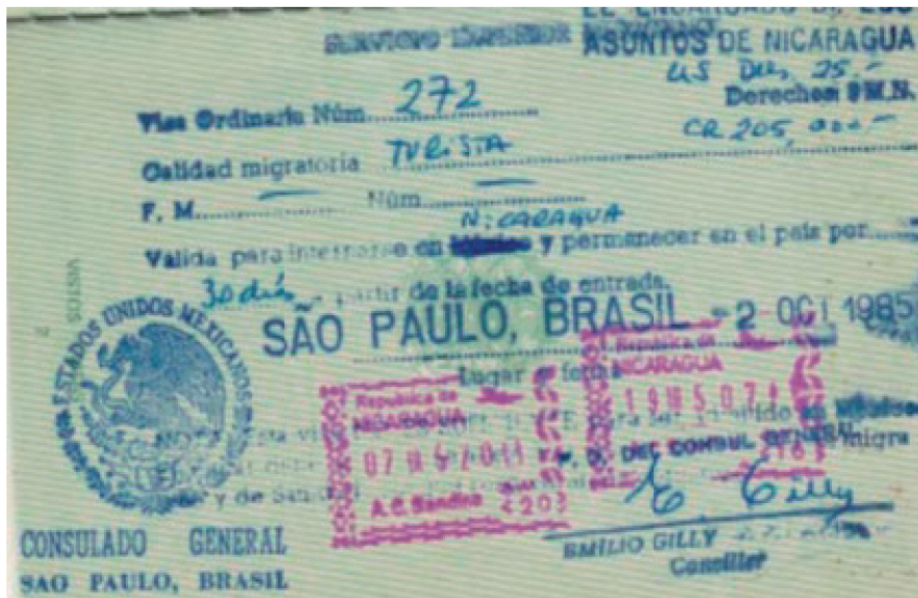


Foto 1 - Passaporte do Geól. João Jeronimo.

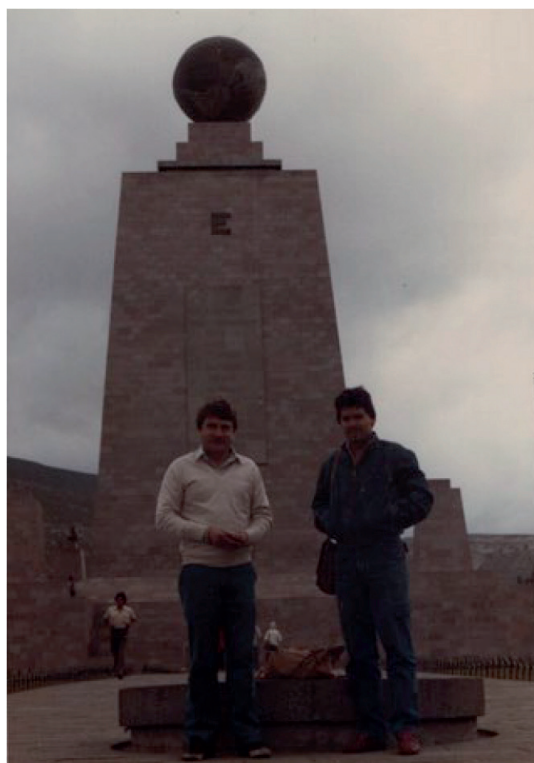


Foto 2 - Os autores junto ao monumento da Linha do Equador, Quito.

3.2 Alertas antes da partida

Antes de sair de São Paulo, os autores foram alertados de que a Nicarágua vivia em dificuldades sociais e econômicas decorrentes da longa guerra contra a ditadura; que o abastecimento de coisas básicas era carente, desde papel higiênico a bebidas; que Manágua era uma região sísmica perigosa; que havia insegurança decorrente de grupos armados que lutavam contra o regime sandinista (denominados “*contras revolucionários*”, ou simplesmente “*Los contras*”).

Quanto aos tremores de terra, o hotel reservado aos viajantes tinha sido uma das poucas estruturas que resistiu ao terrível abalo de 1972. A preocupação se dirigiu, portanto, ao necessário abastecimento de bebidas, petiscos etc., o que foi feito no *free shopping* do aeroporto do Panamá.

Ao chegar a Manágua, na primeira ida ao amplo bar do hotel, notou-se os frequentadores

estrangeiros e locais, tomando um drink feito com suco de laranja, gelo e rum. A partir desse encontro com a realidade local, o estoque de bebidas serviu apenas para presentear os colegas nicaraguenses, pois a bebida preferida dos viajantes foi “*ron con jugo de naranja*”.

3.3 Diárias

Os dois viajantes chegaram em Managua em posse de dólares em papel moeda, liberados pela OLADE/CESP, para as despesas do hotel, refeições, transporte e eventualmente despesas médicas. Na época não havia cartão de crédito e muito menos a possibilidade de uso de cheque de viagem, o chamado *traveller check*, emitido por bancos estadunidenses, para troca por moeda local.

Ao saber do volume em dólares, os colegas nicaraguenses ficaram espantados e imediatamente aconselharam os brasileiros a deixarem

a pequena fortuna no cofre do Instituto Nicaraguense de Energia - INE, para “evitar surpresas desagradáveis”. Houve certo desconforto entre as partes, pois junto a isso vieram as informações de que os salários dos engenheiros locais eram da ordem de 50 dólares por mês, valor equivalente a uma diária do hotel onde se hospedaram os brasileiros.

3.4 Visita às obras dos túneis

A primeira ida a uma obra poucos se esqueceram: ao reclamar da alta velocidade do carro que nos levava, por uma estrada de terra cascalhada, fomos informados que aquela era uma região de presença dos “Contras”; a **velocidade mínima** teria de ser 80 km por hora (Fotos 3 e 4)!



Foto 3 - Encontro, na estrada, com um comboio militar.



Foto 4 - Almoço com colega nicaraguense no refeitório da obra.

3.5 Encontro com um Comandante Sandinista

Por meio de contatos iniciados ainda em São Paulo, e com intermediação de apoiadores locais do sandinismo, João Jerônimo foi convidado a um encontro (num bar sabe-se lá onde!) no início de uma noite, com um comandante sandinista, ainda combatente na ativa. Foram cerca de duas horas de conversas. O fato mais surpreendente, além do riquíssimo tema do bate papo, foi que o comandante somente adentrou ao local após varredura feita com militares fortemente armados. E não se tratava de um comandante, mas de **uma** comandante.

3.6 Visita turística

Em um domingo, os colegas da empresa nicaraguense de eletricidade, nos brindaram com um passeio a uma ilha turística. A melhor lembrança do passeio foi embarcar, na volta ao continente, com um grupo de adolescentes, que bebiam água e comiam goiabas verdes para acalmar os efeitos colaterais de drinks alcoólicos (Foto 5). Uma das várias experiências compartilhadas.



Foto 5 - Confraternização com jovens nicaraguenses.

3.7 Jantar de despedida

Os colegas da ENE gentilmente convidaram João Jerônimo para um jantar de despedida. Tudo ia a mil maravilhas até a entrada em cena de representantes da empreiteira da obra, até então au-

sentes de qualquer contato, se oferecendo a pagar as despesas. Ao manifestar a recusa em aceitar a oferta, e diante da insistência, não restou alternativa a não ser a de continuar a confraternização com os colegas nicaraguenses em outra mesa.



18°C BGE

Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

**Eventos
Extremos**
e sua repercussão na
Geologia de Engenharia
e Ambiental

**17 a 21
Agosto · 2025**

Minascentro
Belo Horizonte - MG

SÓCIOS PATROCINADORES DA ABGE



SEJA SÓCIO DA ABGE ASSOCIADOS INDIVIDUAIS



TÍTULAR



ESTUDANTE



AFILIADO

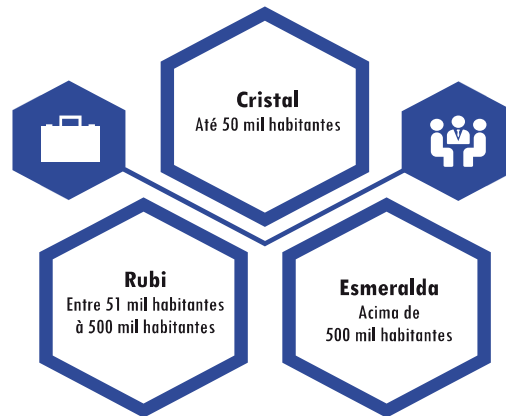


SÊNIOR E MASTER

SÓCIOS PATROCINADORES EMPRESAS E ENTIDADES



SÓCIOS PATROCINADORES COLETIVOS PREFEITURAS



Vantagens do Sócio ABGE

- Recebe grátis todas as publicações editadas pela entidade durante o período de filiação;
- Recebe informações técnicas e acadêmicas/participa de network;
- Desconto em cursos e eventos promovidos pela ABGE e entidades parceiras.

**A melhor relação entre custo e benefício de entidades tecnocientíficas.
Previsão de distribuição de seis publicações no ano.
Consulte os valores de nossa anuidade.**

www.abge.org.br/associe-se



**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
GEOLOGIA DE ENGENHARIA
E AMBIENTAL**