

Avaliação de Métodos Geoelétricos e Sísmicos para Barragens de Rejeitos – Catalão – GO.

Assessment of Geoelectrical and Seismic Methods for Tailing Dams – Catalão – GO.

Gilvan Sá¹; Anne Karine Nunes da Mata Silva²; Ewerton Aparecido Rodrigues³; Marco Antonio da Silva Braga⁴

¹ Federal University of Ouro Preto – UFOP, School of Mines, Engineering Department, Ouro Preto – Minas Gerais – Brazil. E-mail: givilansa1972@gmail.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7303-0778>

² Federal University of Rio de Janeiro – UFRJ, Geology Department, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro – Brazil. E-mail: annekarine@geologia.ufrj.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8166-1435>

³ Technological Federal Center – CEFET, Araxá – Minas Gerais – Brazil. Mosaic Company, Araxá – Minas Gerais – Brazil. E-mail: ewerton.rodrigues@mosaicco.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2854-5615>

⁴ Federal University of Rio de Janeiro – UFRJ, Geology Department, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro – Brazil. E-mail: marcobraga@geologia.ufrj.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0244-4655>

Resumo: Barragens de mineração são projetadas para disposição de materiais provenientes do processo mineral. Possuem contínuo monitoramento geotécnico (inspeções visuais e instrumentações manuais ou automatizadas), para garantir a segurança destas estruturas. Este artigo apresenta os resultados da aplicação de métodos geofísicos no monitoramento e investigação de uma barragem de rejeito. No Brasil, após incidentes envolvendo barragens de mineração, houve a necessidade do aprimoramento das legislações e normas técnicas, bem como das investigações e monitoramentos geotécnicos. Através da eletrorresistividade, foi possível mapear zonas de baixa resistividade, relacionadas a áreas de maior saturação. A interferometria sísmica do ruído ambiente, possibilitou o monitoramento em tempo real da variação da velocidade da onda S (Vs), onde foi verificado uma perda até 11%, na região da crista da barragem, associado a área de maior saturação próximo a ombreira direita e contribuição do período chuvoso. Através do método MASW, verificou-se a diminuição da Vs e sua correlação com áreas de maior saturação obtidos pelo método da eletrorresistividade. A interferometria sísmica do ruído ambiente, possibilitou também verificar a recuperação na variação da Vs. A integração dos métodos geofísicos permitiu identificar anomalias e adotar medidas de engenharia corretivas, colaborando para a segurança da barragem monitorada.

Palavras-chave: Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW); Eletrorresistividade; Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente.

Abstract: Mining tailings dams are engineered structures designed for the disposal of waste materials generated during mineral processing. These structures require continuous geotechnical monitoring, including visual inspections and manual or automated instrumentation, to ensure their safety and stability. This paper presents the application and results of geophysical methods used to monitor and investigate a tailings dam. In Brazil, recent dam failures have prompted significant improvements in legislation, technical standards, and geotechnical investigation protocols. Electrical resistivity was employed to map low-resistivity zones, which are associated with higher degrees of saturation within the dam structure. Ambient noise seismic interferometry enabled real-time monitoring of variations in S-wave velocity (Vs), with reductions reaching 11% at the dam crest. This reduction was linked to higher saturation levels near the right abutment, likely intensified by seasonal rainfall. Additionally, the multichannel analysis of surface waves confirmed the decrease in Vs in areas correlated with those of low resistivity, suggesting increased saturation. Ambient Noise Seismic interferometry also detected a partial recovery in Vs over time. The integration of these geophysical techniques allowed for the identification of structural anomalies and supported the implementation of corrective engineering measures, contributing to improved dam safety and risk management.

Keywords: Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW); Electrical Resistivity; Ambient Noise Seismic interferometry.

1. Introdução

Uma quantidade significativa de rejeitos sólidos é produzida durante a vida útil de uma mina, uma operação de mineração, exigindo a criação de espaços de armazenamento adequados. Para tanto, são construídas barragens, que podem ser feitas de rochas, solo ou até mesmo dos próprios rejeitos. Essas estruturas têm a função principal de armazenar água e/ou rejeitos produzidos durante o processo de beneficiamento.

Existem três métodos principais de construção para a construção e alteamento de barragens de rejeitos: a) Montante, b) Jusante e c) Linha de Centro. Após os incidentes de Mariana e Brumadinho no Brasil, ajustes e mudanças legais significativas nas regulamentações federais e estaduais levaram à proibição explícita do método de construção a montante. Além disso, todas as barragens existentes construídas com esse método foram proibidas de operar, com prazos legais definidos para o processo de descaracterização.

De acordo com Leal et al. (2023), o Brasil possui 769 barragens de rejeitos registradas, das quais 425 estão incluídas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e 344 não. Dentre as barragens sob a PNSB, a maioria (48%) foi construída utilizando o método de etapa única. Para aquelas não incluídas na PNSB, o método de alteamento a jusante também predomina nos casos em que o método construtivo é definido. No entanto, vale ressaltar que aproximadamente $\frac{1}{4}$ dessas barragens (23,3%) possui método construtivo indefinido, o que representa um risco potencial devido à falta de informações claras sobre suas condições de estabilidade e segurança.

O monitoramento dessas barragens normalmente inclui inspeções visuais e instrumentação geotécnica. No entanto, técnicas de monitoramento mais avançadas são necessárias para obter uma compreensão mais completa dessas estruturas e avaliar com precisão as condições atuais e futuras. Os métodos geofísicos, devido à sua capacidade de coletar rapidamente grandes quantidades de dados e ampla cobertura de levantamentos, fornecem um complemento valioso para o exame das características físicas dessas estruturas. Esses métodos incluem a interferometria sísmica de ruído ambiente, a MASW (Análise Multicanal de Ondas de Superfície) e a resistividade elétrica. O primeiro método, a interferometria sísmica de ruído ambiente, monitora as mudanças no módulo de rigidez da estrutura observando a variação na velocidade da onda S. Trata-se de um método de monitoramento contínuo para barragens de mineração, desenvolvido e aplicado com sucesso no Brasil desde 2018 (Dias, 2022). Além disso, o monitoramento contínuo por meio da aplicação microssísmica facilita o registro constante de eventos sísmicos, fornecendo informações essenciais sobre a exposição da barragem à sismicidade. Esta é uma ferramenta vital para orientar ações de prevenção, classificar e definir alertas (TARPs) e elaborar um mapa de risco geotécnico (Mendecki et al., 2010). Além disso, a MASW é empregada para calcular a velocidade da onda S (V_s) em profundidade, enquanto a resistividade elétrica é utilizada para mapear áreas com potenciais alterações ou anomalias no maciço.

Este artigo tem como objetivo apresentar os resultados do método de interferometria sísmica com ruído ambiente e MASW e correlacionar esses achados com os dados de eletrorresistividade obtidos por Sá (2023), corroborando assim a aplicação desses métodos geofísicos para aprimorar a compreensão das variações nas propriedades físicas dessas estruturas ao longo do tempo. Essas análises foram conduzidas durante as etapas de reforço da barragem de mineração, fornecendo insights sobre os resultados alcançados ao longo do projeto de reforço.

2. Área de Estudo

A barragem em estudo (Figura 1) está situada no interior do estado de Goiás, a aproximadamente 22 km da cidade de Catalão, e faz parte do Complexo Mineroquímico de Catalão. Ao longo de sua operação, a barragem passou por quatro etapas de construção para atender às demandas do processo industrial. A etapa inicial envolveu a construção do dique inicial na El. 743,00 m, em 1982, e posteriormente alteado para El. 763,00 m. A segunda etapa de alteamento, em 2012, atingiu a elevação de 773,00 m, seguida por uma terceira etapa em 2016, alteando o aterro para El. 778,00 m. O aterro se estende por aproximadamente 1.040,00 m e cobre um reservatório de cerca de 695,00 ha. Além disso, sete sumps foram instalados na cota de 778,00 m para coletar rejeitos, permitindo sua secagem e, posteriormente, sua reutilização no processo construtivo após atingirem o nível aceitável de umidade previsto no projeto. Nos alteamentos, foi utilizada uma combinação de métodos de linha de centro e a montante.

A barragem passou por um processo de reforço do eixo em 2020, a fim de atender à legislação vigente (Figura 2). Na base, foi utilizado enrocamento para melhorar as condições de suporte a jusante. Além disso, foram utilizados magnetita e rejeitos do próprio processo de beneficiamento. Foram utilizados materiais de transição com granulometrias ajustadas aos requisitos de projeto, incluindo brita 3, brita 0 e areia (Figura 3). Os rejeitos passaram por um processo de secagem em poços localizados na crista da barragem, especificamente nos poços 1 a 7 (Figura 6).

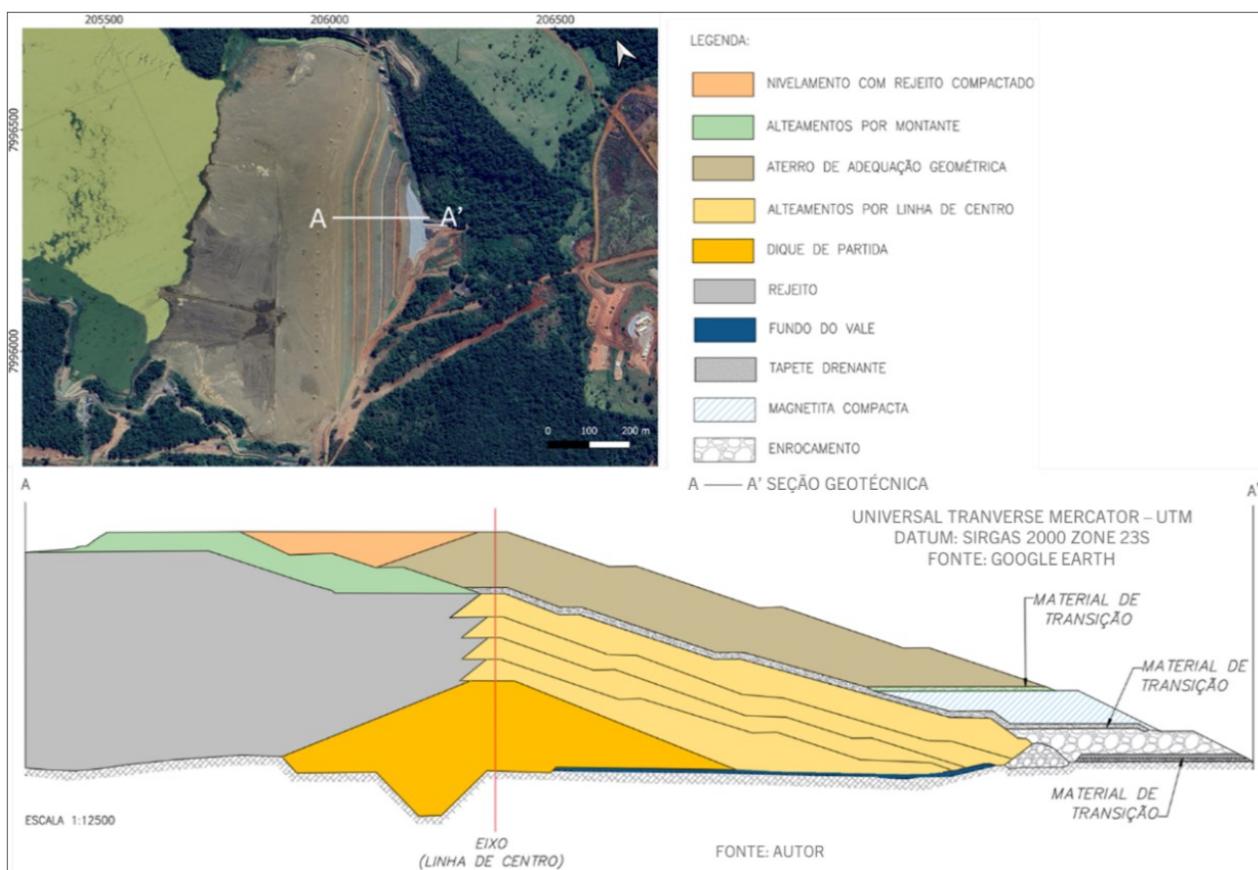


Figura 1 – Representação esquemática dos principais componentes da barragem e uma seção transversal representativa detalhando os materiais constituintes do aterro. Sistema de coordenadas: SIRGAS 2000, Zona UTM 23S.

Fonte: Autores (2024).

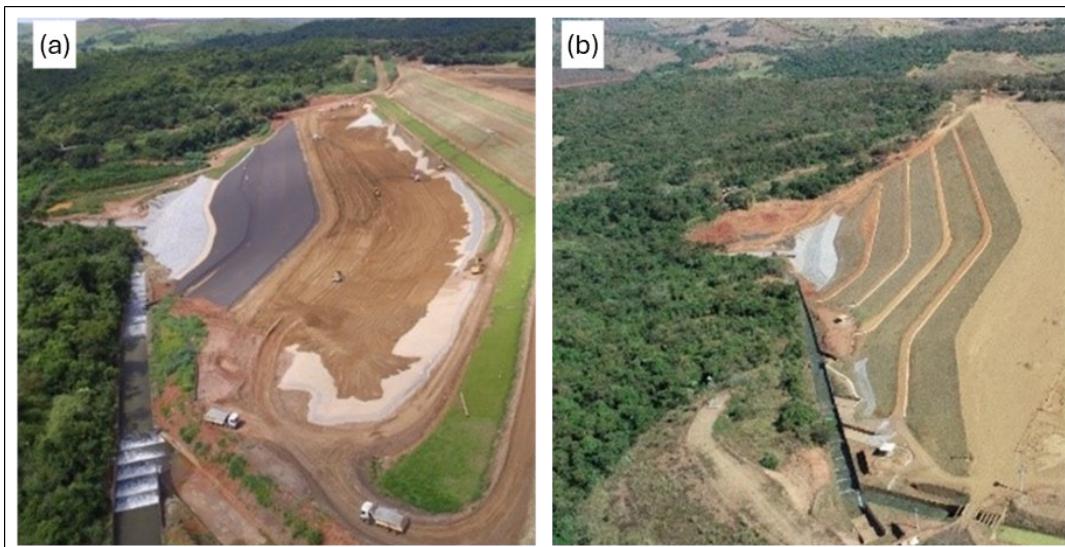
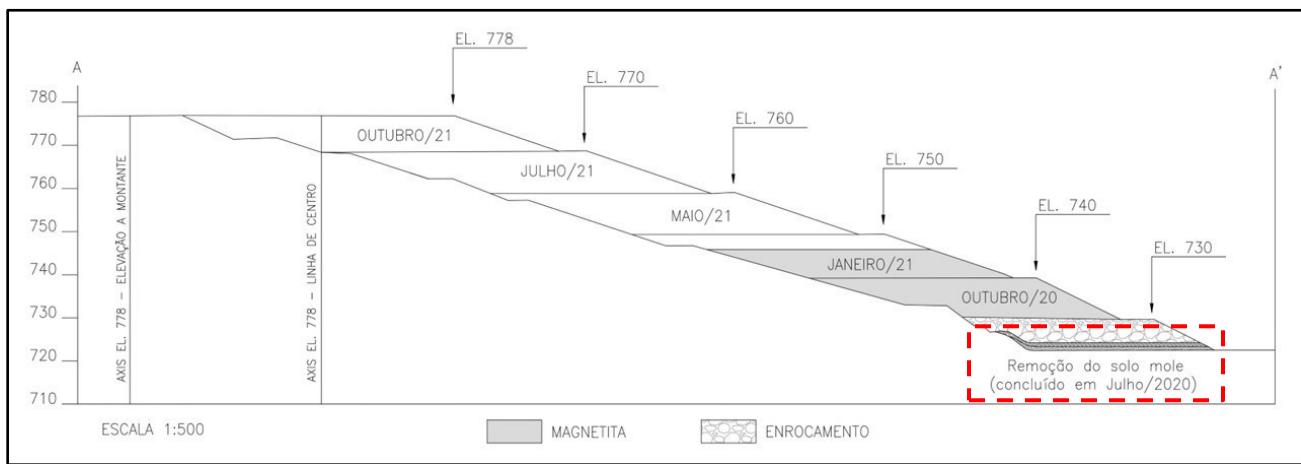


Figura 2 – Etapas da construção da barragem. (a) Diferentes etapas da construção com aplicação de materiais de transição. (b) Etapa final da obra após a conclusão do reforço.

Fonte: Autores (2024).

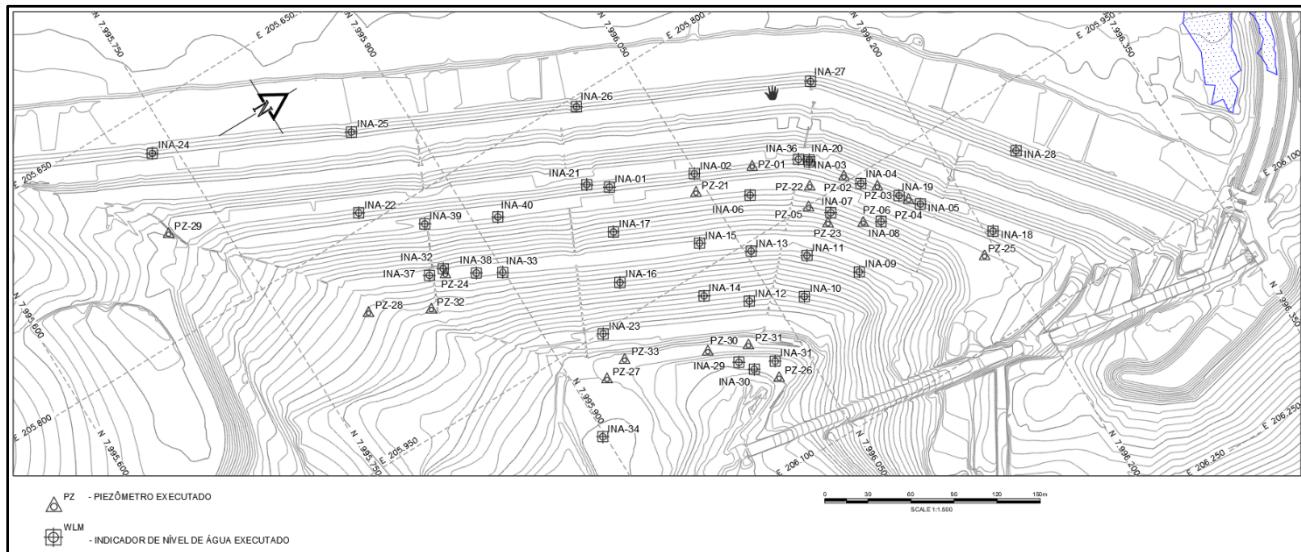


*Figura 3 – Etapas da construção do projeto de reforço da linha central.
Fonte: Autores (2024).*

3. Material and Métodos

3.1. Aquisição de Dados

Para avaliar a segurança da construção da barragem, foram implementados métodos de monitoramento geofísico, como resistividade elétrica, microssísmica, incluindo interferometria sísmica de ruído ambiente, e o método MASW (Análise Multicanal de Ondas de Superfície). Esses métodos geofísicos foram integrados a técnicas convencionais de monitoramento, que desempenham um papel fundamental no suporte a investigações geológicas e geotécnicas. Métodos convencionais, incluindo indicadores de nível d'água e piezômetros, também contribuem para a avaliação das condições das águas superficiais e subterrâneas. A Figura 4 indica o arranjo da instrumentação convencional, mostrando a localização dos indicadores de nível d'água e piezômetros.



*Figura 4 – Localização dos indicadores de nível d'água (INA)s e piezômetros para monitoramento da barragem.
Fonte: Autores (2024).*

O método de resistividade elétrica baseia-se na injeção de corrente elétrica no solo e na medição das diferenças de potencial entre pares de eletrodos, permitindo a determinação da resistividade do material subterrâneo (Sá et al., 2024).

Em 2020, foram realizados um total de 23 perfis de resistividade elétrica utilizando o método de imagem elétrica. Esses perfis foram posicionados ao longo do corpo da barragem, da praia e dos encontros da Barragem BR, dispostos paralelamente à crista da estrutura. Foi utilizado um resistivímetro SpertSing, configurado com espaçamento de eletrodos de 4 metros, um arranjo dipolo-dipolo e 84 canais, alcançando profundidades de investigação que variam de 40 a 85 metros. Os resultados, com foco no encontro direito, nas proximidades dos geofones 2, 5 e 6, são apresentados na Figura 8. Mais detalhes estão disponíveis em Sá et al. (2023).

A interferometria sísmica de ruído ambiente permite o monitoramento contínuo da variação na velocidade de propagação das ondas sísmicas dentro do maciço das estruturas monitoradas, utilizando o ruído ambiente como fonte passiva (Olivier et al., 2017; Planès et al., 2016). De acordo com Wapenaar et al. (2010), este método refere-se ao princípio de geração de uma resposta ao impulso por meio da correlação cruzada de observações sísmicas em diferentes geofones do receptor. Este método permite o monitoramento em tempo real da variação do módulo de rigidez da estrutura por meio de mudanças na velocidade da onda de cisalhamento (VS).

É essencial manter a integridade dos registros coletados para garantir um monitoramento eficaz. A aleatoriedade na distribuição das fontes de ruído é necessária para observar heterogeneidades, comparando registros em intervalos de tempo preestabelecidos (Curtis et al., 2006). Essa comparação é realizada na onda de coda para avaliar mudanças ambientais (Figura 5). As ondas de coda, devido à sua natureza dispersiva e caminho de viagem complexo, são sensíveis a mudanças ambientais, tornando-as ideais para avaliar mudanças no ambiente dentro de um determinado cenário geológico. Essa sensibilidade não é observada em ondas de corpo. Consequentemente, a interferometria sísmica de registros de ruído ambiente, sob a abordagem microssísmica, captura variações na velocidade de propagação das ondas sísmicas, estimadas a partir de mudanças no tempo de trânsito das ondas de coda entre a fonte e o receptor dentro do ambiente considerado (Planès et al., 2016).

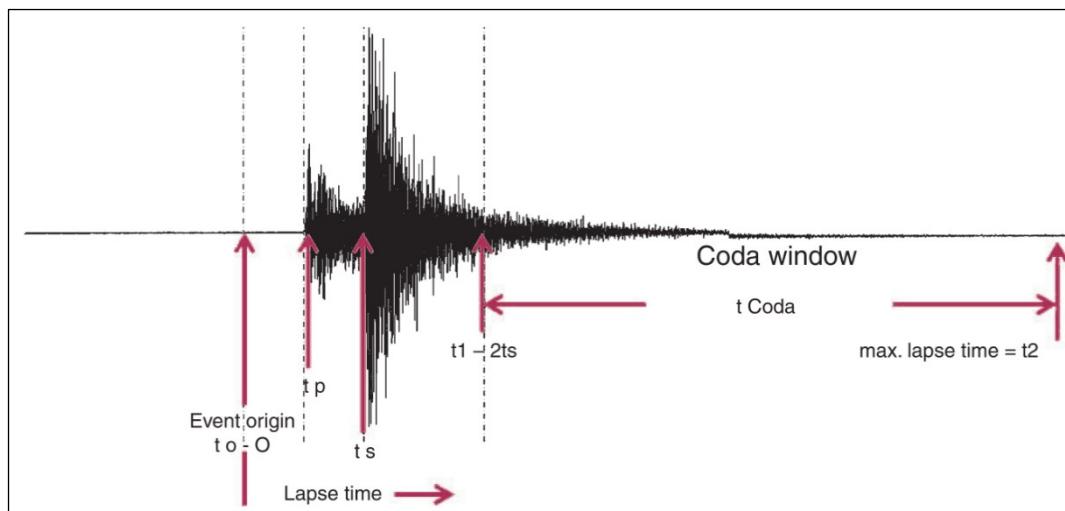


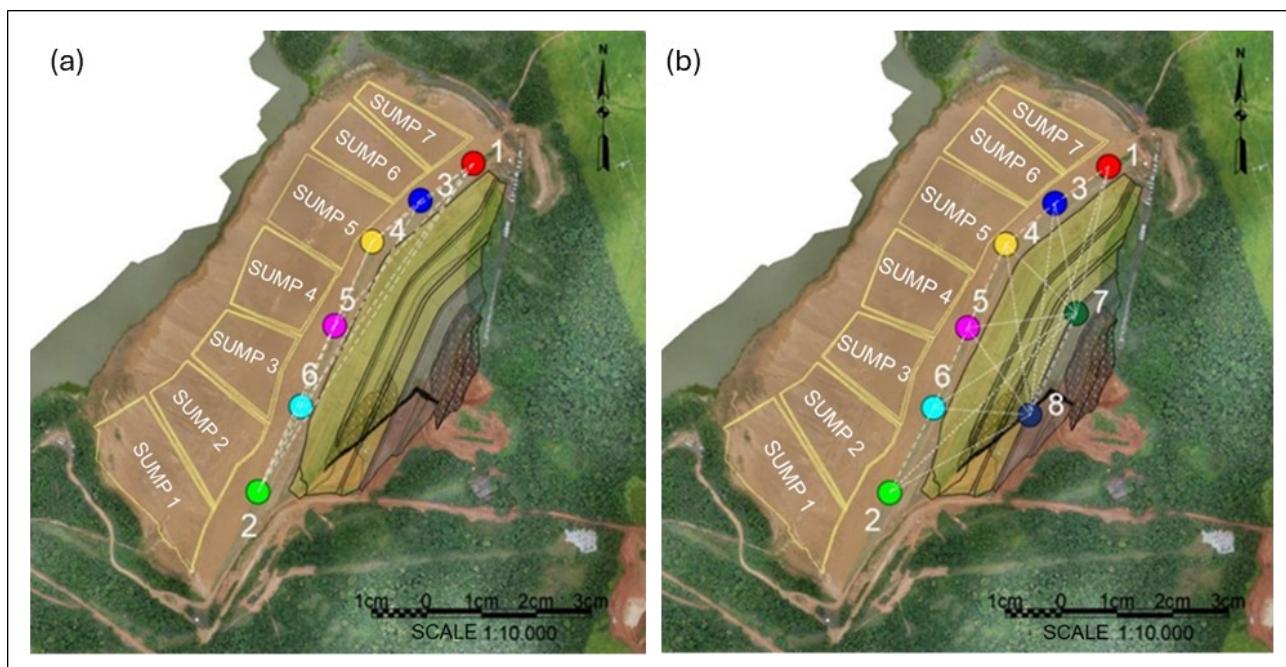
Figura 5 – Sismograma indicando os tempos de chegada das ondas P e S e a região tardia caracterizada como janela de Coda.

Fonte: Kim et al. (2017).

A interferometria sísmica de ruído ambiente, com foco na análise da janela de coda, destaca efetivamente as variações na velocidade das ondas S, significando mudanças na rigidez do meio. De acordo com Rodrigues et al. (2019), este método mede a variação da velocidade sísmica continuamente, que está ligada à rigidez do material. Tal rigidez é influenciada por fatores como mudanças na pressão dos poros, carregamento, fraturamento e até mesmo erosão interna. Quando um aumento no tempo de chegada das ondas S é detectado, isso indica uma redução na velocidade e, portanto, na rigidez do material. Isso significa que a mudança na velocidade da onda S está intimamente relacionada à equação que descreve o cisalhamento puro. De acordo com Breton et al. (2021), a alteração na velocidade das ondas de cisalhamento S (Vs) está diretamente ligada ao módulo de cisalhamento (G) e a densidade do meio (ρ):

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1)$$

O sistema de monitoramento microssísmico foi projetado para cobrir todo o maciço da barragem, considerando seu histórico de alteamento, obras de adaptação e estruturas de drenagem interna, bem como o pareamento entre os geofones sísmicos. O sistema proposto é composto por oito geofones sísmicos, sendo seis geofones sísmicos uniaxiais (SMGU) de 4,5 Hz instalados no maciço da barragem e dois geofones sísmicos triaxiais (SMGT) de 14 Hz, todos fabricados pelo *Institute of Mine Seismology (IMS)*, localizados nas ombreiras próximas ao contato com o terreno natural. A instalação foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa, na cota 778,00 m, foram instalados os geofones sísmicos 01 a 06 na crista da barragem, sendo os geofones 03 a 06 uniaxiais e 01 e 02 triaxiais. Na segunda etapa, após a conclusão das fases de adaptação, envolvendo a aplicação de material rochoso (enrocamento) na cota 730,00 m e o aterro com magnetita até a cota 778,00 m, o sistema de monitoramento microssísmico foi projetado para cobrir todo o maciço da barragem. Na cota 740,00 m, os geofones 07 e 08 foram instalados em bermas intermediárias, sendo ambos uniaxiais (Figura 6).



*Figura 6 – Geofones sísmicos + sumps – (a) 1º. etapa (b) 2º. etapa.
Fonte: Autores (2024).*

O método MASW, conforme descrito por Lin et al. (2004), é utilizado para examinar as propriedades elásticas do solo e do subsolo por meio da análise de ondas superficiais, particularmente ondas cisalhantes. Este método envolve a coleta de dados sismográficos multicanal para registrar a propagação de ondas originadas de uma fonte sísmica, como um martelo ou um explosivo controlado. A análise dessas ondas permite a geração de perfis essenciais de velocidade de cisalhamento (V_s), cruciais para a caracterização geotécnica do solo, a identificação de camadas subterrâneas e a avaliação de potenciais zonas de fragilidade ou instabilidade. Em julho de 2021, quatro seções sísmicas foram adquiridas a jusante da barragem utilizando 24 geofones espaçados de 5 metros. Os resultados da onda S obtidos a partir do monitoramento de ruído ambiente e do MASW foram comparados para validar os resultados. Além disso, esses resultados foram correlacionados com as variações observadas nos instrumentos de monitoramento (INAs e PZ). Para resumir, a interferometria sísmica do ruído ambiente demonstra uma variação percentual na velocidade da onda S (V_s), enquanto a MASW fornece essa velocidade em metros por segundo (m/s).

3.2. Interpretação de dados

As informações neste artigo referem-se ao período de outubro de 2020 a julho de 2021. A análise dos dados de interferometria sísmica de ruído ambiente envolve a correlação cruzada de sinais de múltiplos geofones para Função de Green, que auxilia na determinação da velocidade das ondas sísmicas. Na interpretação dos dados, consideramos o comportamento da variação da onda S, considerando diversos fatores, como o impacto da estação chuvosa, a influência da formação de esporões e a sequência de obras de reforço durante esse período. Comparamos a influência do reforço no módulo de rigidez da barragem e o aumento ou diminuição da velocidade da onda S (V_s), considerando as variações do nível d'água nos piezômetros e INAs, bem como a sequência de construção do reforço. Isso nos permitiu avaliar as condições geofísicas da estrutura para o período analisado.

4. Resultados e Discussões

Os dados de variação da velocidade da onda S (V_s) foram avaliados de outubro de 2020 a julho de 2021 (Figura 7). Além disso, é possível correlacionar o monitoramento geofísico com a interpretação dos INAs e PZs para cada local, bem como com os gráficos da estação chuvosa e do monitoramento do reservatório. Os INAs 24, 25, 26, 32, 40 e PZ 29 foram considerados por estarem localizados mais próximos dos geofones 2, 5 e 6, que apresentaram maiores perdas na velocidade da onda S (V_s), conforme observado na Figura 7.

Entre 01/10/2020 e 31/07/2021, durante a execução dos trabalhos de reforço na El. 770,00 m, observou-se uma diminuição gradual nas curvas $dv/v\%$ a partir das leituras de interferometria dos seis geofones localizados na crista da barragem. Essa diminuição continuou até julho de 2021 (Figura 7). Durante esse período, a perfuração de rejeitos nos poços localizados na crista da barragem estava em operação, com o objetivo de desaguá-los e secá-los para utilização no processo de reforço. O material depositado nos poços era composto por 65% de água e 35% de sólidos.

A Figura 8 indica a variação do nível d'água dos INAs de 1 a 6,89 m e do PZ com variação de cerca de 5 m. Além disso, é evidente a influência do período chuvoso, com precipitação variando de 20 a 25 mm, com pico de 60 a 80 mm e ocasionalmente ultrapassando 100 mm.

Na parte central do maciço, o geofone 5 apresentou a redução mais significativa na velocidade, seguido pelos geofones 2 e 6 na ombreira direita (Figura 6). Essas reduções de velocidade totalizaram aproximadamente 11%, 10% e 10,5%, respectivamente, provavelmente devido ao impacto das operações de espigotamento durante a estação chuvosa. Como resultado dessas mudanças nas curvas $dv/v\%$, o processo de espigotamento foi realocado para os *sumps* mais próximos da ombreira esquerda (*sumps* 5, 6 e 7), conforme ilustrado na Figura 6. A partir de julho de 2021, a taxa $dv/v\%$ se estabilizou e mostrou um ligeiro aumento de cerca de 2 a 3% até o início de outubro. Além disso, em junho de 2021, mais dois geofones de monitoramento, 7 e 8, foram introduzidos a jusante da barragem, com o geofones 7 posicionado próximo à ombreira esquerda e o geofones 8 próximo à ombreira direita (Figura 6).

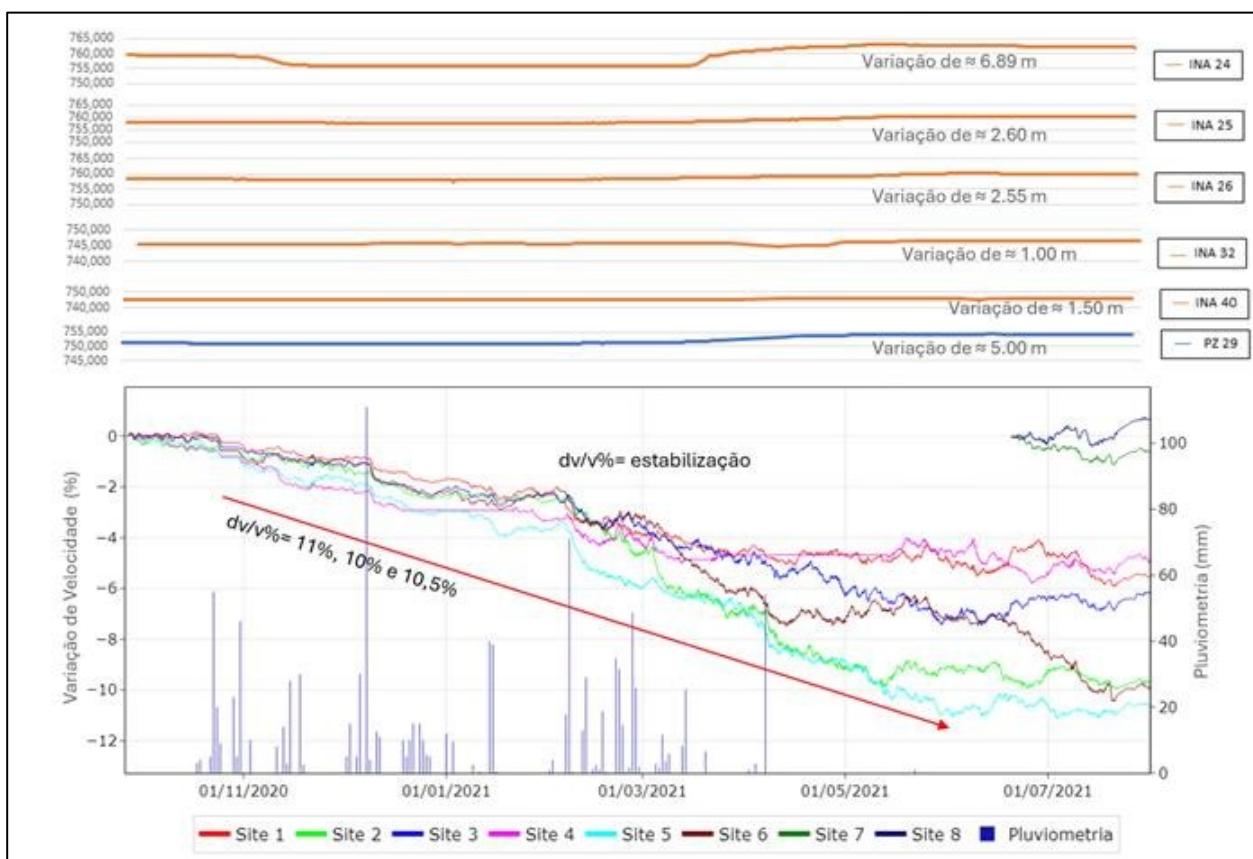


Figura 7 – Intervalo analisado no período de 01/10/2020 a 31/07/2021. A figura mostra a variação do nível d'água medida por medidores de nível d'água (INAs) e piezômetros, comparada com a variação da velocidade da onda S ($dv/v\%$) ao longo do tempo e a precipitação acumulada diária. A seção superior exibe os níveis d'água medidos por diferentes INAs (24, 25, 26, 32, 40) e pelo piezômetro PZ 29, com variações entre 1,0 m e 6,89 m, indicando mudanças no comportamento da saturação. A seção inferior mostra a variação percentual da velocidade da onda S ($dv/v\%$) em vários geofones (1 a 8) ao longo do tempo, correlacionando-a com a precipitação (barras azuis). A estabilização é observada após uma redução significativa de 10% a 11% na velocidade da onda S, relacionada ao aumento da umidade. A linha vermelha destaca uma redução de até 11% na velocidade.

Fonte: Autores (2024).

De acordo com Sá et al. (2023), uma zona de alta condutividade elétrica foi descoberta na ombreira direita por meio de levantamentos de resistividade elétrica. Uma diminuição notável na velocidade da onda S foi observada nos dados de interferometria sísmica com ruído ambiente nos geofones 2, 5 e 6 (Figura 8). Além disso, a análise MASW também confirmou uma baixa velocidade da onda S (V_s), consistente com os achados da interferometria sísmica com ruído ambiente. Ao revisar o levantamento MASW realizado na barragem, anomalias com velocidades da onda S (V_s) abaixo de 200 m/s foram observadas perto dos geofones 2, 5 e 6 (Figura 9). Conforme indicado por Sá (2023), essas anomalias, localizadas na ombreira direita perto dos geofones 2, 6 e 5, estão associadas a zonas de baixa resistividade elétrica ZBR (Figura 8). Isso corresponde aos comportamentos observados nos geofones 2, 6 e 5, onde não há aumento da onda S (V_s), como observado nos demais geofones (Figura 8).

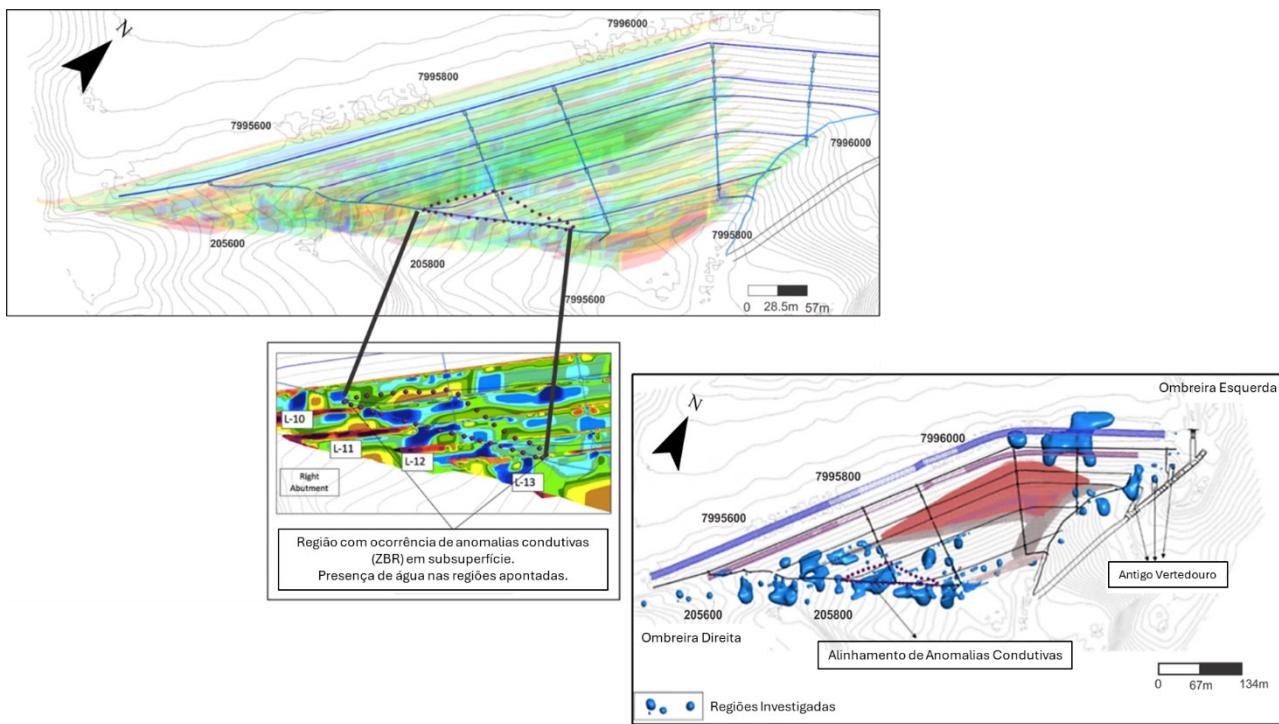


Figura 8 – Seções L-10, L-11, L-12 e L-13 em detalhes, mostrando a ombreira direita e as anomalias condutivas no subsolo. As linhas azuis representam os drenos da barragem. Zonas de modelagem e investigação do conjunto de dados ERT, indicadores-chave para zonas de alta umidade.

Fonte: Sá et al. (2023).

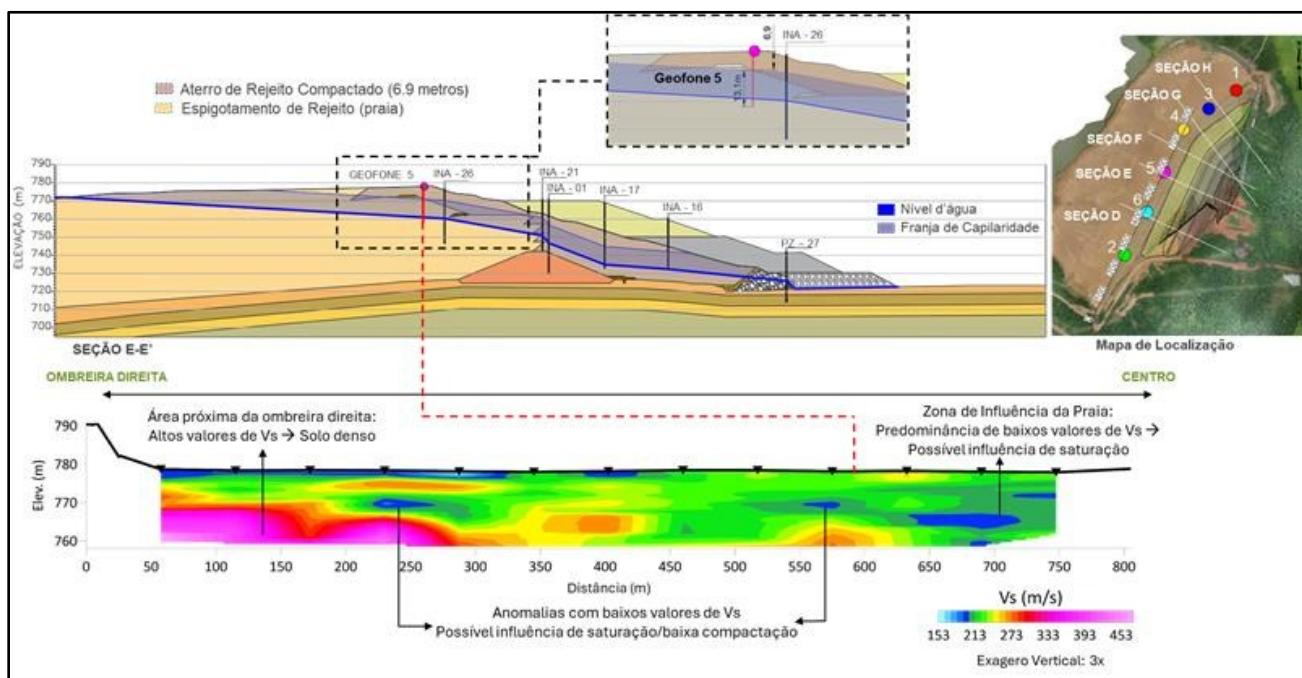


Figura 9 – Levantamento sísmico pelo método MASW, baixas velocidades da onda S (V_s) na ombreira da direita.
Fonte: Autores (2024).

5. Considerações finais

Por meio da aplicação do método da resistividade elétrica, foi identificada uma zona de baixa resistividade (ZBR) na região dos geofones 2, 6 e 5, conforme mostrado na Figura 8. Esse fenômeno está associado à presença de áreas com alta condutividade hidráulica ou materiais mais porosos e condutores, o que influencia diretamente as características de propagação das ondas sísmicas. Essa alta condutividade explica a baixa velocidade da onda de cisalhamento (V_s) observada na região.

O método MASW (Análise Multicanal de Ondas de Superfície) também confirmou uma perda significativa de velocidade (Figura 9). A redução na velocidade da onda de cisalhamento ocorre devido à diminuição da rigidez do material na zona saturada ou de alta condutividade. Isso significa que o material sob a barragem apresenta maior concentração de umidade ou contém estruturas internas menos consolidadas, como fraturas ou zonas fracas, o que reduz a eficiência da propagação das ondas sísmicas.

Essa área de alta condutividade elétrica está relacionada ao aumento da umidade, causado pelo processo de espigotamento nos *sumps* 1, 2 e 3, utilizados para armazenamento e secagem de rejeitos, cujo material faz parte das obras de reforço da barragem. Esse processo, aliado à precipitação significativa registrada no período analisado, teve impacto direto nas leituras de velocidade da onda S (V_s). Como resultado, os geofones localizados nessa área apresentaram velocidades reduzidas em comparação aos demais geofones, mesmo após a mudança das operações do *sump* para a ombreira esquerda da barragem (Figura 7).

A integração dos métodos de resistividade elétrica, interferometria sísmica de ruído ambiente e MASW permitiu a comparação de zonas de baixa resistividade (ZBR), indicando que áreas com excesso de umidade e zonas afetadas por intervenções operacionais, como deposição de rejeitos nos reservatórios 1, 2 e 3, podem influenciar o módulo de rigidez e as propriedades mecânicas dos materiais que compõem a barragem.

A água presente nos poros do material afeta a propagação das ondas, reduzindo a resistência do solo ou da rocha e, consequentemente, a velocidade da onda de cisalhamento (V_s). Essa redução na velocidade das ondas S representa um importante indicador geofísico para a identificação de áreas com maior potencial de instabilidade estrutural, o que poderia comprometer a integridade da barragem se não fosse monitorado adequadamente.

Após identificar uma diminuição na velocidade da onda de cisalhamento (V_s) de aproximadamente 11%, 10% e 10,5%, respectivamente (Figura 7), juntamente com as reduções em V_s indicadas pelo método MASW, foi tomada a decisão de

realocar as atividades de espigotamento para a ombreira esquerda, especificamente nos sumps 5, 6 e 7. Esse ajuste operacional levou a uma estabilização na perda de Vs observada nos geofones 2, 6 e 5 (Figura 7).

É de extrema importância continuar o monitoramento após as obras de reforço, e a instalação dos geofones 7 e 8 foi essencial para a compreensão e o refinamento das informações obtidas sobre o comportamento hidrogeotécnico da barragem, melhorando a cobertura da investigação. Isso permitirá o refinamento dos métodos geofísicos aplicados, proporcionando um histórico mais longo dos dados observados.

Após a obra de reforço da barragem, era esperado um aumento nos valores de velocidade da onda de cisalhamento (Vs) devido ao aumento do módulo de rigidez (G), o que não foi observado neste estudo de caso. Isso indica que a diminuição da velocidade da onda de cisalhamento (Vs) está diretamente relacionada ao aumento da umidade na massa da estrutura. Embora tenha sido observada estabilização da velocidade da onda S (Vs), seguida de um aumento de aproximadamente 2 a 3%, é essencial manter um monitoramento contínuo para verificar essas tendências. Operações que utilizam processos de espigotamento na crista deste tipo de estrutura geotécnica devem ser rigorosamente avaliadas, instrumentadas e monitoradas. Perdas significativas na velocidade da onda S (Vs) devem desencadear planos de ação para garantir operações mais seguras, minimizando riscos aos trabalhadores e prevenindo problemas geotécnicos ou de engenharia de construção.

Por meio do monitoramento contínuo, é possível melhorar a confiabilidade e a segurança em futuras interpretações e decisões, além de possibilitar a construção de um modelo integrado que correlacione dados de instrumentação geotécnica com dados de monitoramento geofísico. É importante validar e correlacionar os diversos métodos de monitoramento geotécnico para aprimorar a compreensão de áreas com maior teor de umidade. Um exemplo dessa abordagem pode ser encontrado em Sá et al. (2023), que correlacionaram dados obtidos em levantamentos de resistividade elétrica com a posição da superfície freática, determinada pela instrumentação de INAs e PZs. Essa correlação permitiu a identificação de zonas de baixa resistividade (ZBR).

Neste contexto, o presente trabalho identificou reduções na velocidade da onda de cisalhamento (Vs), obtidas por meio dos métodos de interferometria de ruído ambiente e MASW, associadas às operações de espigotamento nos geofones 2, 5 e 6, que correspondem às zonas de baixa resistividade mapeadas por Sá et al (2023).

Este modelo é importante para validar o comportamento hidrogeotécnico de barragens de mineração, garantindo a integridade e a segurança da estrutura.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada (CPGA) da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ por todo o apoio nesta pesquisa.

Referências

- BRETON, M. L.; BONTEMPS, N.; GUILLEMOT, A.; BAILLET, L.; LAROSE, É. Landslide Monitoring Using Seismic Ambient Noise Correlation: Challenges and Applications. *Earth-Science Reviews*, Elsevier BV, v. 216, p. 103518, 2021.
- CURTIS, A., GERSTOFF, P., SATO, H., SNIEDER, R., & WAPENAAR, K. Seismic Interferometry - Turning Noise into Signal. *The Leading Edge*, v. 25, n. 9, p. 1082-1092, 2006.
- DIAS, L. S. O.; BRAGA, M. A.; CUNHA, A. S.; OLIVIER, G.; MACHADO, D.M. Mining Induced Ground Motions in a Tailings Dam. *Anuário do Instituto de Geociências*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 45, p. 1-12, 2022.
- EATON, D. W.; BAAN, M.; INGELSON, A. Terminology for Fluid-Injection Induced Seismicity in Oil and Gas Operations. *CSEG Recorder*, v. 41, p. 5, 2016.
- KAMEI, R.; NAKATA, N.; LUMLEY, D. Introduction to Microseismic Source Mechanisms. *The Leading Edge*, v. 34, n. 8, p. 876–880, 2015.
- KIM, J. K.; OH, T. S.; YOO, S. H.; WEE, S. H. Amplification Characteristics of Seismic Observation Geofones From S-Wave Energy, Coda Waves and Background Noise from the Fukuoka Earthquake Series. *Exploration Geophysics*, v. 48, n. 3, p. 264–271, 2017.

- LEAL, F.C.A.; GOMES, W.V.G.; SILVA, P.J.L.; GONÇALVES, P.H.F.; NETO, O.F.; JÚNIOR, O.F.S. Uma revisão dos acidentes em barragens de rejeito de mineração da América do Sul e o cenário brasileiro. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 8, n. 1, p. 10-27, 2022.
- LIN, C. P.; CHANG, C. C.; CHANG, T. S. The Use of MASW Method in the Assessment of Soil Liquefaction Potential. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 24, n. 9-10, p. 689-698, 2004.
- MENDECKI, A. J.; LYNCH, R. A.; MALOVICHKO, D. A. Routine Micro-Seismic Monitoring in Mines. *Australian Earthquake Engineering Society 2010 Conference*. Perth, Western Australia, p. 33, 2010.
- OLIVIER, G.; BRENGUIER, F.; WIT, T.; LYNCH, R. Monitoring the Stability of Tailings Dam Walls with Ambient Seismic Noise. *The Leading Edge*, v. 36, n. 4, p. 9, 2017.
- PLANÈS, T., MOONEY, M. A., RITTGERS, J. B. R., PAREKH, M. L., BEHM, M., & SNIEDER, R. Time-lapse Monitoring of Internal Erosion in Earthen Dams and Levees Using Ambient Seismic Noise. *Géotechnique*, v. 66, n. 4, p. 301–312, 2016.
- RODRIGUES, C. T.; DE PAULA, A. Q.; CORRÊA, T. R.; SEBASTIÃO, C. S.; COSTA, O. V.; MAGALHÃES, G. G.; SANTANA, L. D. Passive Seismic Interferometry's State-of-the-art—a Literature Review. *Sustainable and Safe Dams Around the World/Un Monde de Barrages Durables et Sécuritaires*, p. 2951-2960, 2019.
- SÁ, G.; BRAGA, M. A.; ALMEIDA, L. A. P. E.; DIAS, L. S. D. O.; CUNHA, A. D.A.; ROCHA. D. C. G D. Geophysical Key Indicator for Tailings Dam Physical Integrity Monitoring – Brazil. *REM – International Engineering Journal, Ouro Preto -MG*, v. 76, n. 4, p. 363-370, 2023.
- SÁ, G.; DA MATA, A. K. N.; VILLAR, J. A. A.; BRAGA, M. A.; RODRIGUES, E. A.; PINTO, L. A.; TELLES, R. L. T.; LEITE, P. Métodos Geofísicos Aplicados no Monitoramento de Barragens de Rejeito. Estudo de Caso na BR de Catalão, GO. In: 51 °Congresso Brasileiro de Geologia, 2024, Belo Horizonte. *Anais... Belo Horizonte*: SBG, 2024. p. 920. Disponível em: <https://51cbg.com.br/sites/cbg2024/anais>. Acesso em: 24 mar. 2025.
- WAPENAAR, K.; DRAGANOV, D.; SNIEDER, R.; CAMPMAN, X.; VERDEL, A. Tutorial on seismic interferometry: Part 1 — Basic principles and applications. *Geophysics*, v. 75, n. 5, p. 75A195–75A209, 2010.