

Monitoramento de Barragem de Rejeito Através de Métodos Geofísicos: Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente e Eletrorresistividade – Barragem B1B4, Araxá (MG)

Mining Tailings Dam Monitoring Using Geophysical Methods: Ambient Noise Seismic Interferometry and Electrical Resistivity – B1B4 Dam, Araxá (MG)

Anne Karine Nunes da Mata Silva¹; Marco Antonio da Silva Braga²; Maria Filipa Perez da Gama³; Gilvan Sá⁴; Ewerton Aparecido Rodrigues⁵; Igor Leonardo Gama⁶; Thiago Oliveira⁷; Ricardo Luiz Teixeira Telles⁸

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada (CPGA)/ Departamento de Geologia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Email: annekarine@geologia.ufjf.br

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

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada (CPGA)/ Departamento de Geologia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Email: marcobraga@geologia.ufjf.br

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

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada (CPGA)/ Departamento de Geologia, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Email: filipa@geologia.ufjf.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8084-8954>

⁴ Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: gilvansa1972@gmail.com

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

⁵ Mosaic Fertilizantes do Brasil, Araxá/MG, Brasil. Email: ewerton.rodrigues@mosaicco.com

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

⁶ Mosaic Fertilizantes do Brasil, Araxá/MG, Brasil. Email: igor.gama2@mosaicco.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3069-5709>

⁷ Mosaic Fertilizantes do Brasil, Araxá/MG, Brasil. Email: thiago.oliveira20@mosaicco.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5603-5517>

⁸ Mosaic Fertilizantes do Brasil, Araxá/MG, Brasil. Email: ricardo.telles@mosaicco.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2287-8120>

Resumo: As barragens de rejeitos de mineração e resíduos industriais requerem monitoramento constante devido ao impacto ambiental e ao risco de rompimento. No Brasil, existem 941 barragens cadastradas, sendo 340 localizadas em Minas Gerais. Para o acompanhamento da integridade dessas estruturas, são realizados monitoramentos por meio de inspeções visuais e instrumentação convencional, como piezômetros, o que demanda tempo e planejamento para o processamento dos dados. Métodos geofísicos surgem como alternativas complementares, proporcionando maior cobertura e rapidez na aquisição de dados. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar os parâmetros físicos da Barragem B1B4, localizada em Araxá, por meio da interferometria sísmica, que monitora a variação da velocidade da onda S (Vs), permitindo avaliar mudanças no módulo de rigidez da estrutura, e da eletrorresistividade, que identifica zonas de umidade, categorizando-as em zonas de baixa (<56 ohm.m), intermediária e alta resistividade (>371 ohm.m). Os dados de interferometria mostraram maior variação de Vs durante períodos de alta pluviosidade, sugerindo alterações nas propriedades físicas do maciço. Os dados de eletrorresistividade indicaram a presença de áreas condutivas e resistivas, fornecendo informações para identificar zonas de maior umidade. A integração desses métodos demonstrou-se eficaz para monitorar mudanças nas propriedades físicas do maciço, complementando técnicas tradicionais.

Palavras-chave: Barragens de Rejeito; Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente; Eletrorresistividade.

Abstract: Tailings dams for mining and industrial waste require constant monitoring due to their environmental impact and the risk of failure. In Brazil, there are 941 registered dams, 340 of which are located in Minas Gerais. To ensure the integrity of these structures, monitoring is conducted through visual inspections and conventional instrumentation, such as piezometers, which require significant time and planning for data processing. Geophysical methods emerge as complementary alternatives, offering broader coverage and faster data acquisition. Thus, this study aims to evaluate the physical parameters of the B1B4 Dam, located in Araxá, using Ambient Noise Seismic Interferometry, which monitors variations in the S-wave velocity (Vs), enabling the assessment of changes in the structure's stiffness modulus, and electrical resistivity, which identifies moisture zones categorized into low (<56 ohm.m), intermediate, and high resistivity zones (>371 ohm.m). Seismic interferometry data showed greater variations in Vs during periods of high rainfall, suggesting changes in the physical properties of the dam body. Electrical resistivity data indicated the presence of conductive and resistive areas, providing information to identify "Higher Moisture Zones". The integration of these methods proved effective in monitoring changes in the dam's physical properties, complementing traditional techniques.

Keywords: Tailings Dam; Ambient Noise Seismic Interferometry; Electrical Resistivity.

1. Introdução

Diversos países ao redor do mundo, sejam desenvolvidos ou em desenvolvimento, dependem das atividades de mineração para sustentar a economia, em que é eviente um crescimento histórico significativo na produção mineral global. De acordo com Leal et al. (2022), a produção mineral em 2012 foi seis vezes maior do que em 2000. As atividades de mineração geram uma quantidade substancial de resíduos sólidos, que são armazenados em barragens de rejeitos ou pilhas de estéril. Segundo Olivier et al. (2017), essas estruturas são particularmente vulneráveis a falhas, especialmente as barragens de rejeitos, pois são construídas a partir de materiais residuais da atividade mineradora, passam por sucessivos alteamentos durante a operação e, em muitos casos de países em desenvolvimento, operam sem muita regulamentação. Esses fatores, somados ao elevado custo de manutenção após o encerramento das operações, aumentam significativamente os riscos de falha, que podem ser até 100 vezes maiores do que os associados às barragens convencionais (Azam & Li, 2010). Hariri-Ardebili (2017) argumenta que avaliações probabilísticas de risco podem aprimorar a compreensão dos mecanismos de falha e reduzir as incertezas associadas.

Na engenharia de construção de barragens, o conhecimento geotécnico do local de instalação, incluindo dados de tensões e sismicidade, é fundamental para os cálculos de projeto (Mendes, 2018; Silveira et al., 2021; Silveira & Pedroso, 2018). No Brasil, barragens de diferentes portes são utilizadas para finalidades como armazenamento de água, geração de energia, contenção de resíduos industriais e, principalmente, de rejeitos da mineração (Espósito et al., 2010). O projeto e a construção de barragens de rejeitos exigem o conhecimento das propriedades dos materiais envolvidos, das condições do terreno e dos riscos associados a explosões de mineração ou eventos sísmicos. As falhas podem decorrer de fatores como manutenção inadequada, falhas de projeto, descumprimento de normas regulatórias, acúmulo de efluentes tóxicos e problemas na fundação (Cardozo et al., 2016).

Dada a magnitude de potenciais desastres das barragens de rejeitos, é essencial identificar medidas de prevenção de acidentes para garantir sua estabilidade. Tradicionalmente, os maciços compactados são estabilizados por meio do controle da massa específica seca e do teor de umidade das camadas, técnica similar àquela aplicada em fundações de edificações e em pavimentação de rodovias (Resende et al., 2013). O monitoramento contínuo, que inclui inspeções visuais e instrumentação convencional, é essencial. No entanto, os métodos geofísicos vêm sendo cada vez mais utilizados como complemento para aprimorar a avaliação das condições dessas estruturas (Mainali et al., 2015; Martini et al., 2016; Nikonow et al., 2019; Mollehuara-Canales et al., 2021).

De acordo Sá (2023), os métodos geofísicos são eficiente na coleta de grandes volumes de dados e na realização de levantamentos com ampla cobertura espacial. Técnicas como a interferometria sísmica com ruído ambiente e a eletrorresistividade contribuem para o diagnóstico das condições geotécnicas da barragem. O ruído sísmico, composto majoritariamente por ondas superficiais, pode ser classificado em microtremores (>1 Hz) e microseísmos (<1 Hz), de acordo com seu conteúdo espectral (Schuster, 2014; Hussain et al., 2017). Já a eletrorresistividade, permite identificar variações nas propriedades do subsolo, como salinidade, teor de umidade, concentração de metais e pH, que influenciam nas características elétricas e podem indicar possíveis fluxos de água (Martinez-Pagán et al., 2021; Freitas et al., 2024).

Os métodos geofísicos são fundamentais para sistemas de alerta precoce, pois conseguem detectar mudanças na rigidez do solo e na saturação hídrica, que podem preceder processos de instabilidade (Pankow et al., 2014). Desde 2018, seu uso tem se expandido no monitoramento de barragens de mineração no Brasil (Dias et al., 2022). A integração com instrumentações convencionais contribui para uma gestão mais eficiente. Por exemplo, a interferometria sísmica permite avaliar as variações na rigidez por meio da análise da velocidade das ondas S, enquanto a resistividade elétrica identifica possíveis anomalias internas nos maciços (Braga & Gama, 2024). Ambas as técnicas são úteis na detecção precoce de processos de percolação (Mainali et al., 2015).

Neste estudo, os métodos da interferometria sísmica do ruído ambiente e eletrorresistividade foram aplicados para avaliar os parâmetros físicos e sua relação com as condições geológico-geotécnicas. O objetivo é não apenas monitorar as condições de barragens de rejeito, mas também fornecer subsídios para ações preventivas de segurança.

2. Área de Estudo

A área de estudo está situada na Província Ígnea do Alto Paranaíba, que faz parte da porção Sul da Faixa Brasília, cinturão dobrado, que pertencente à Província Estrutural Tocantins (Almeida et al., 1977). Esse cinturão orogênico se formou ao longo da borda oeste do Cráton do São Francisco durante o Neoproterozoico. A região é caracterizada por metassedimentos, como xistos e quartzitos, além da presença de corpos intrusivos e extrusivos neocretáceos associados a magmatismo máfico-ultramáfico, alcalino e ultrapotássico (Jácomo et al., 2010).

A Barragem B1B4 faz parte do Complexo Químico de Mineração de Araxá, localizado na porção oeste de Minas Gerais, em que a atividade principal é a extração de fosfato. A barragem iniciou a operação em 1979 e teve suas atividades encerradas em março de 2019. Foi construída para a contenção de rejeitos finos ciclados provenientes de processos industriais.

Inicialmente composta por duas estruturas distintas, B1 (no vale à esquerda) e B4 (no vale à direita), a barragem foi unida na cota 978,00 e passou a operar como um único barramento. As etapas de alteamento foram realizadas pelo método de linha central, utilizando o próprio material de rejeito. A Figura 1 apresenta os principais componentes da barragem, além de uma seção típica que destaca os materiais predominantes do maciço. A fundação da estrutura é composta, principalmente, por uma camada de rocha alterada recoberta por solo residual.

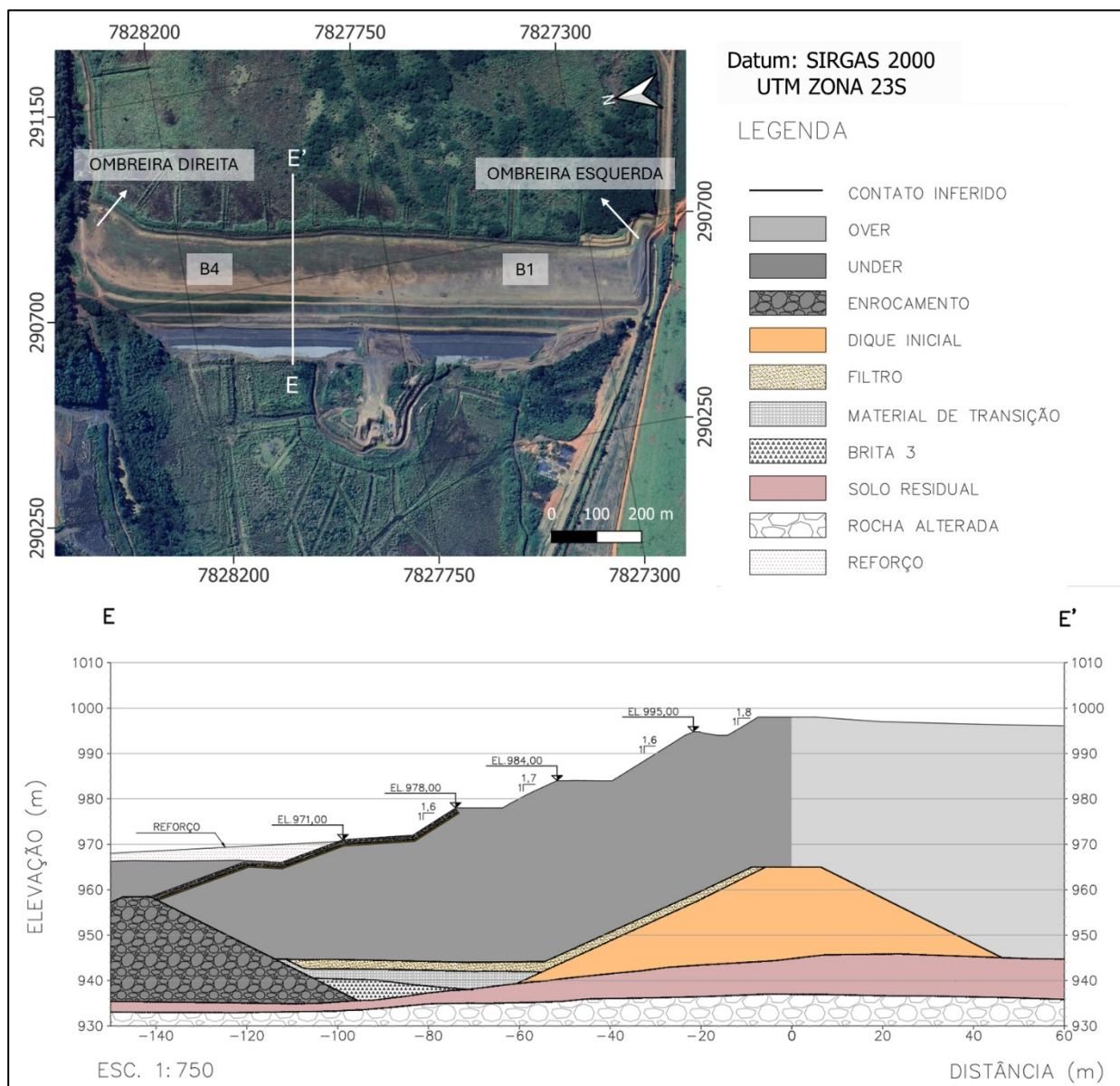


Figure 1 – Seção típica E-E' representando o arranjo geral da Barragem B1B4.

Fonte: Autores (2025).

3. Materiais e Métodos

3.1. Aquisição de Dados

Embora a barragem em estudo tenha encerrado suas operações, processos de desestabilização ainda podem ocorrer. Para identificá-los, utiliza-se instrumentação convencional (piezômetros e indicadores de nível d'água), e, para complementar o monitoramento, sistemas de monitoramento geofísico foram aplicados na barragem. Para o monitoramento geofísico, foi utilizado o método da microssísmica, abrangendo a interferometria sísmica do ruído ambiente, com o objetivo de compreender a variação da rigidez do maciço com base nas variações de velocidade da onda S. Além disso, por ser amplamente utilizado em investigações de barragens, o método da Eletrorresistividade foi escolhido para este estudo com o objetivo de entender melhor a estrutura da barragem, principalmente no que se refere à presença de infiltrações não controladas no interior do maciço e nas ombreiras.

3.1.1. Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente (ISRA)

A aquisição de dados utilizando o método da Interferometria Sísmica de Ruído Ambiente (ISRA) consiste na instalação de uma rede de geofones ao longo da estrutura a ser monitorada, como uma barragem. Esses geofones registram continuamente o ruído sísmico ambiente, que é gerado tanto por atividades humanas quanto por fenômenos naturais.

O funcionamento da interferometria sísmica envolve duas etapas principais. A primeira é a obtenção da correlação cruzada entre dois sinais registrados por diferentes pares de sensores. A segunda é a soma dessas correlações cruzadas para melhorar a qualidade do sinal (Curtis et al., 2006). De acordo com Rodrigues et al. (2019), essa técnica permite identificar a diferença de tempo de propagação das ondas sísmicas entre dois pares de sensores.

Este método é baseado na extração da função de *Green* entre dois sensores. Essa função representa o comportamento das ondas sísmicas registradas ao longo do tempo em um sensor, como se uma fonte impulsiva tivesse sido ativada no outro sensor (Planès et al., 2016). De acordo com Wapenaar et al. (2010), o termo “interferometria sísmica” refere-se ao princípio de gerar novas respostas sísmicas a partir de fontes virtuais, por meio da correlação cruzada de observações sísmicas em diferentes locais de recepção. Dessa forma, os sinais captados pelos geofones são processados por correlação cruzada, permitindo determinar o tempo de propagação das ondas sísmicas entre os sensores. Esse processo possibilita estimar as variações na velocidade de propagação das ondas sísmicas no meio monitorado.

Para possibilitar o processamento de dados em tempo real e alcançar a sensibilidade necessária para identificar pequenas variações na velocidade de propagação, utiliza-se a porção mais dispersiva do espectro de ondas adquirido, conhecida como “onda coda”. A dispersão múltipla dessa onda permite uma amostragem prolongada do meio, tornando perceptíveis pequenas mudanças de velocidade (Rodrigues et al., 2019). A velocidade de propagação das ondas mecânicas é uma propriedade intrínseca do meio, regida por leis físicas estabelecidas. As variações de velocidade medidas na onda coda correspondem, em sua maioria, a mudanças na velocidade das ondas S (Wit & Olivier, 2017), que são ondas de corpo associadas à tensão de cisalhamento do meio de propagação.

Assim, quando o material está perdendo rigidez, observa-se um aumento no tempo de chegada da onda S entre um par de sensores, indicando que o meio monitorado está perdendo velocidade. Segundo Breton et al. (2021), a variação da velocidade da onda de cisalhamento (V_s) depende da razão entre o módulo de cisalhamento (μ) e a densidade do meio (ρ). Além disso, vale destacar que as ondas S não se propagam em meios fluidos, o que significa que a perda de velocidade pode estar relacionada a esse fator. Nesse caso, a velocidade de uma onda de corpo do tipo cisalhante (V_s), que envolve cisalhamento puro, é dada pela equação 1:

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

Esses fatores são particularmente importantes para o monitoramento barragens. Na barragem em estudo, foram instalados seis geofones ao longo do maciço, sendo quatro geofones uniaxiais e dois triaxiais, cobrindo a estrutura da barragem e registrando dados em regime de monitoramento em tempo real, 24 horas por dia. Os geofones 1 a 6 foram posicionados ao longo da crista da barragem, sendo que os geofones 1 e 2, ambos triaxiais, foram instalados em cada uma das ombreiras. Os geofones 7 e 8 foram instalados nos taludes da barragem (Figura 2). Para o monitoramento desta barragem, foi utilizado o *software* Trace, desenvolvido pelo *Institute of Mine Seismology* (IMS), para processar e analisar os registros sísmicos da barragem no período de julho de 2020 a fevereiro de 2024.

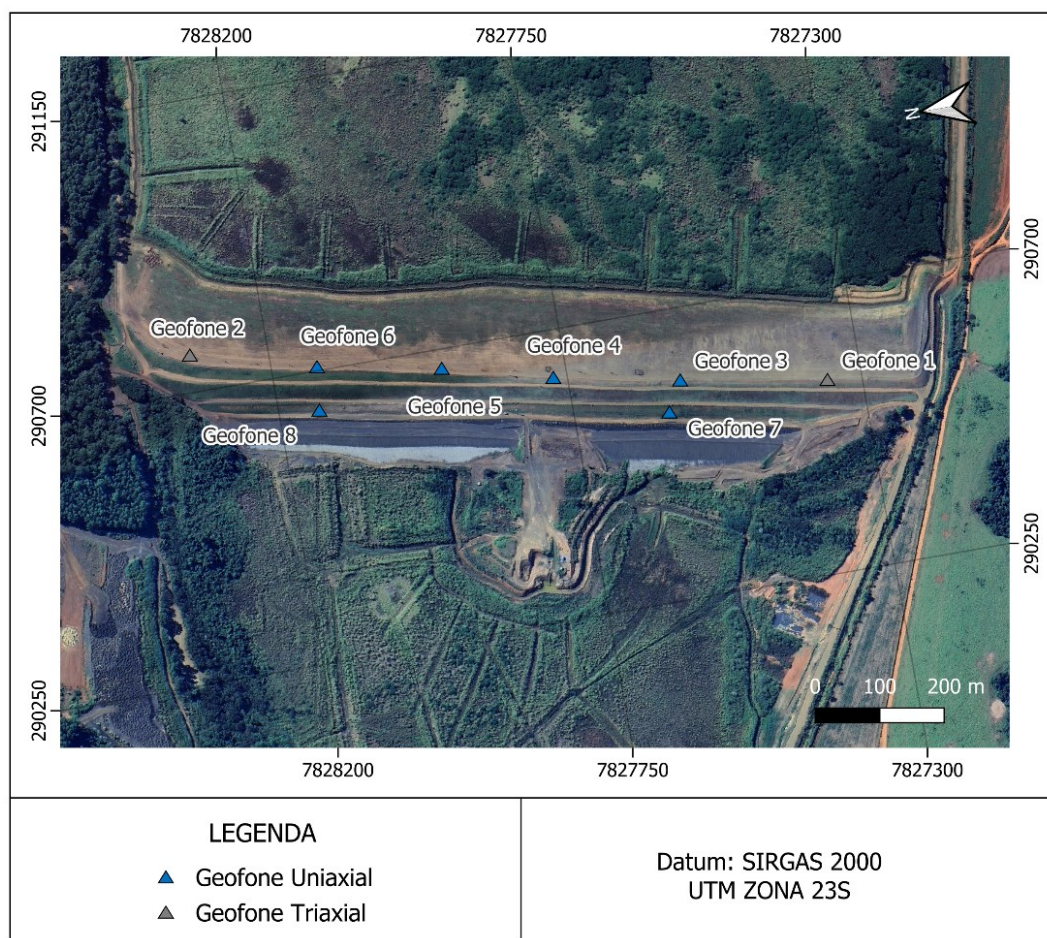


Figure 2 – Localização dos geofones para o monitoramento.

Fonte: Autores (2025).

3.1.2. Eletrorresistividade (ER)

O método da Eletrorresistividade (ER) consiste na medição da resistividade elétrica do solo, que é influenciada pela presença de água e por outras propriedades físicas do material. A aquisição dos dados é realizada por meio da instalação de eletrodos ao longo da área a ser investigada. Esses eletrodos são utilizados para injetar corrente elétrica no solo e medir a diferença de potencial resultante, permitindo assim a construção de uma imagem da distribuição da resistividade elétrica no subsolo. A interpretação dos dados envolve a análise das seções de resistividade obtidas, onde anomalias como zonas de baixa resistividade podem indicar áreas com alta umidade, enquanto zonas de alta resistividade podem corresponder a regiões secas. Esse método é eficaz na identificação de infiltrações, zonas frágeis e outras anomalias que podem comprometer a segurança estrutural da barragem.

Os equipamentos utilizados para a aquisição dos dados incluíram os resistímetro SAS 4000 da ABEM e o SuperSting da AGI, ambos configurados com 64 canais e espaçamento entre eletrodos de 3,0 metros (L-01 a L-18). Antes do início da aquisição de dados, foram realizados testes com diferentes arranjos de eletrodos. O arranjo Dipolo-Dipolo demonstrou uma relação sinal-ruído significativamente melhor na barragem em estudo, além de apresentar uma boa relação entre profundidade de investigação e resolução lateral, confirmando o que já foi observado em trabalhos publicados (Dahlin & Zhou, 2004; Loke et al., 2013; Sá et al., 2023).

A campanha de eletrorresistividade analisada, realizada entre julho e setembro de 2020, foi a última executada na barragem desde a paralisação das operações em 2019. Durante essa campanha, foram feitas 21 seções de resistividade elétrica ao longo do corpo e da praia da barragem B1B4, totalizando 16.067,29 metros. As seções L-01 a L-03 foram

adquiridas na área da praia, orientadas paralelamente ao eixo da estrutura, com espaçamento entre linhas de 40 metros. As seções L-04 a L-12B foram coletadas na região do corpo da barragem, também paralelas ao eixo, com espaçamento entre linhas variando de 15 a 30 metros. As seções L-10 a L-12 foram subdivididas devido à presença de uma área úmida na Barragem B1, o que impediu sua continuidade. As seções L-13 a L-18 foram adquiridas tanto na praia quanto no corpo da barragem, orientadas perpendicularmente ao eixo, com espaçamento entre linhas variando de 80 a 130 metros. A Figura 3 indica a localização das seções em planta, juntamente com a base topográfica da estrutura.

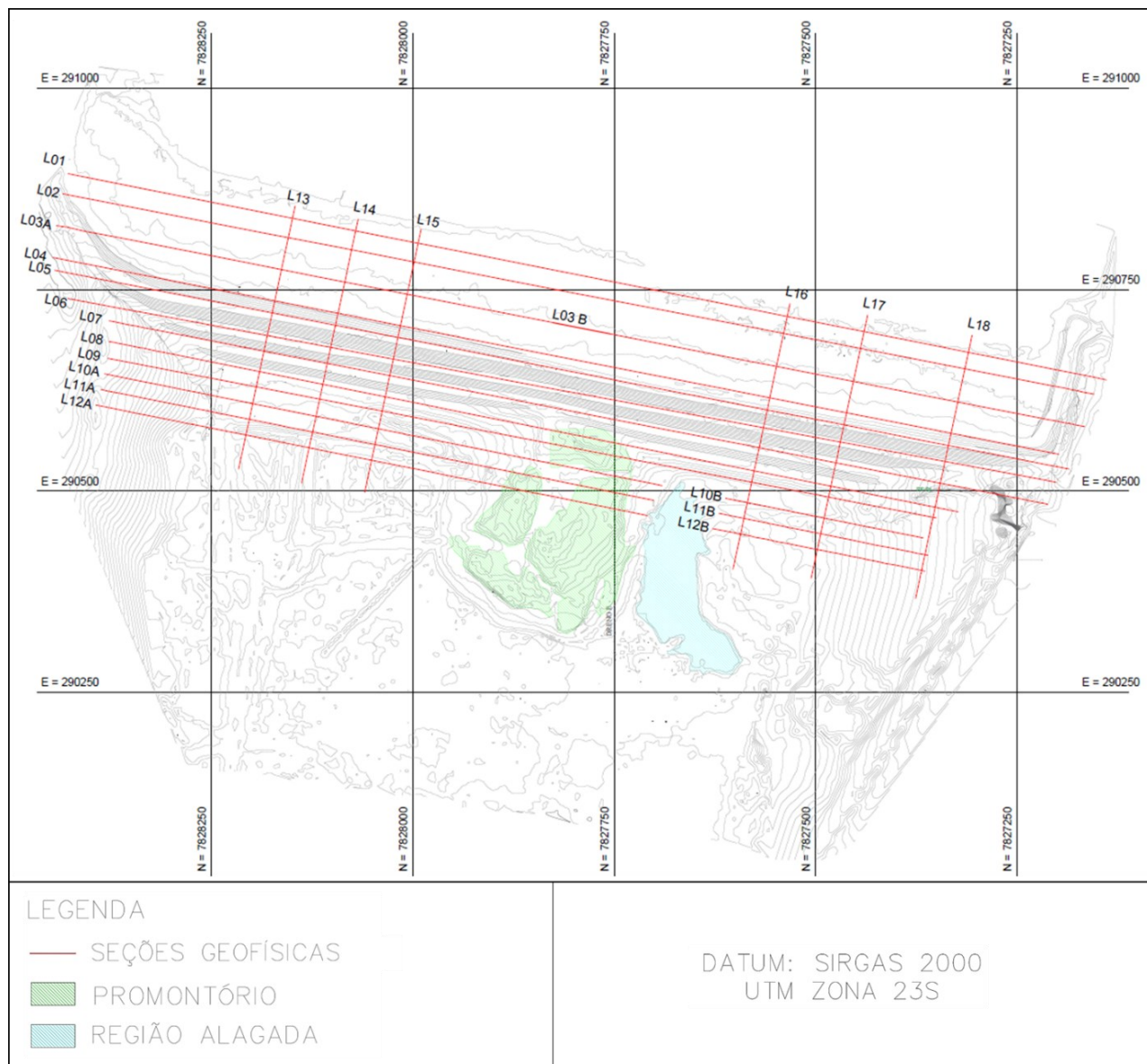


Figure 3 – Seções de eletrorresistividade realizadas na barragem. Seções L-01a L-12 estão paralelas ao eixo da barragem e seções L-13 a L-18 são perpendiculares ao eixo.

Fonte: Autores (2025).

3.2. Interpretação dos Dados

A interpretação dos dados obtidos pelo método da ISRA envolve algumas etapas. Inicialmente, a correlação cruzada dos sinais sísmicos permite calcular variações na velocidade de propagação das ondas de cisalhamento, uma propriedade

física que pode indicar a integridade estrutural da barragem. A análise das ondas coda, a parte mais dispersiva do espectro de ondas, aumenta a sensibilidade na detecção de pequenas variações de velocidade, indicando alterações nas propriedades físicas do meio, como o módulo de cisalhamento e a densidade.

A interpretação contínua e em tempo real desses dados permite mapear anomalias, como zonas com alta umidade ou processos de erosão interna, o que facilita a detecção precoce de problemas estruturais e a adoção de medidas preventivas, tornando essa técnica uma ferramenta poderosa e não invasiva para a gestão de riscos em barragens.

Todos os dados foram extraídos do *software* Trace, desenvolvido pelo *Institute of Mine Seismology* (IMS), sendo processados e interpretados com base nessa plataforma. Neste estudo, foram avaliados dados do período de julho de 2020 a fevereiro de 2024, sendo observadas as variações da velocidade das ondas S e os índices pluviométricos para avaliar a variação da rigidez da barragem.

A interpretação dos dados de eletrorresistividade começou com o processamento dos dados brutos utilizando o *software* Res2DInv. Esses dados processados foram então importados para um software de visualização 3D (Leapfrog Geo), onde foram integrados às características estruturais da barragem e às informações geotécnicas disponíveis. Após essa integração, cada seção gerada foi analisada detalhadamente, e as faixas de anomalias foram comparadas com as medições dos níveis d'água. Essa análise permitiu a identificação de três zonas distintas de resistividade para cada campanha: Zonas de Baixa Resistividade (LRZ), que podem indicar áreas com alta umidade ou presença de argila, Zonas de Alta Resistividade (HRZ), correspondentes a regiões secas, e Zonas de Resistividade Intermediária (IRZ), que ficam entre esses dois extremos. Uma abordagem de classificação semelhante foi utilizada em estudos de outras barragens por Camarero e Moreira (2017), Sá (2023) e Oliveira (2023).

Para realizar a modelagem, os dados foram importados para um ambiente tridimensional, gerando uma nuvem de pontos com coordenadas (X, Y e Z) e seus respectivos valores de resistividade aparente. Os pontos foram posteriormente classificados com base em seus valores de resistividade, sendo que pontos com resistividade inferior a 56 ohm.m foram identificados como “Zonas com Maior Umidade e/ou Conteúdo de Argila”, condizentes com materiais que apresentam umidade nos poros e/ou características argilosas. Por fim, volumes de contorno foram criados para esses pontos categorizados utilizando a opção de “interpolação intrusiva” no Leapfrog Geo (Figura 4).

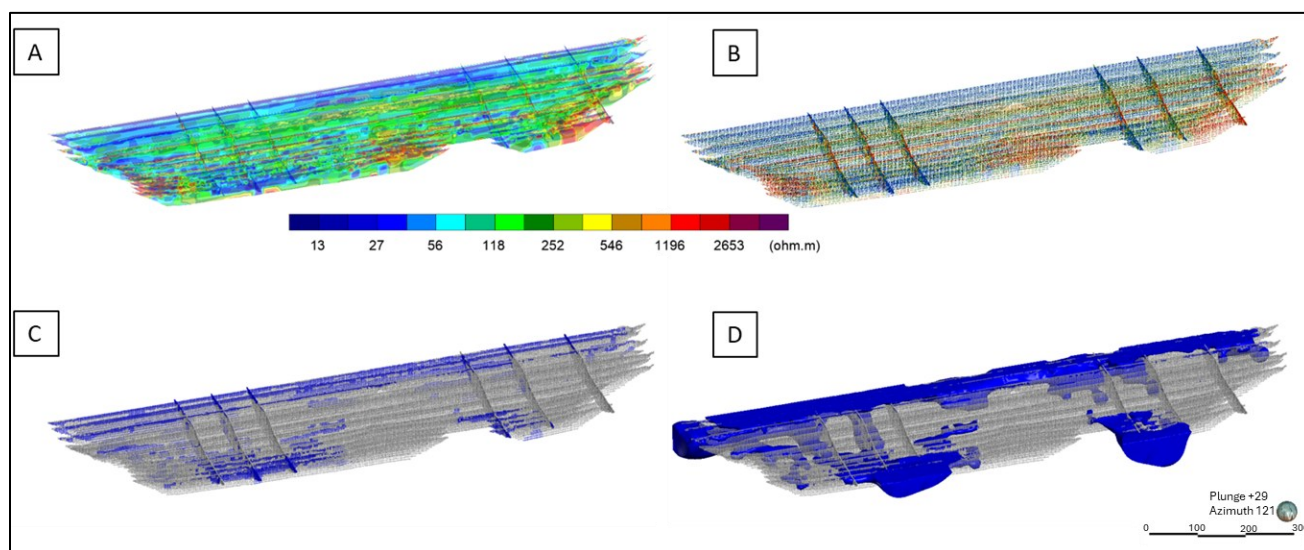


Figura 4 – A: Importação de pontos georreferenciados contendo informações sobre a resistividade aparente dos materiais; B: Categorização dos pontos de baixa resistividade como “Zonas de Umidade”; C: Criação de superfícies a partir dos pontos categorizados; D: Geração de volumes com base na delimitação das superfícies no contexto da barragem.

Fonte: Autores (2025).

4. Resultados e Discussões

4.1. Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente

Os dados obtidos por meio desse método foram processados utilizando o *software* Trace, resultando no gráfico apresentado na Figura 5. De modo geral, o gráfico indica a variação da velocidade das ondas S em relação aos índices de precipitação de chuva. Durante o período de análise (julho de 2020 a fevereiro de 2024), alguns geofones apresentaram problemas, representados por uma linha contínua no gráfico. No entanto, isso não comprometeu a análise geral dos dados.

Os resultados indicam, de forma geral, um aumento na velocidade da onda S (V_s) entre julho e outubro de 2020, período em que apresentou pouca ou nenhuma precipitação de chuvas. No entanto, entre julho e setembro, observa-se uma leve queda na velocidade da V_s (%), como mostrado no início do gráfico. Entre outubro de 2020 e fevereiro de 2021, sendo geralmente um período chuvoso, a velocidade da onda S apresentou algumas variações, mas com tendência consistente de queda, atingindo um valor mínimo de -1%, representando uma redução total de 5%. Durante esse período, em alguns dias de novembro de 2020, o nível de precipitação chegou a 5 mm, causando um aumento na velocidade da onda S (V_s). Porém, logo em seguida, os níveis de chuva subiram para cerca de 80 mm, provocando nova queda na velocidade da V_s .

Entre janeiro e fevereiro de 2021, houve uma recuperação na velocidade de aproximadamente 1%, já que não ocorreram chuvas nesse intervalo. No entanto, a velocidade voltou a cair após dias consecutivos de chuva, com níveis de precipitação variando entre 82 e 10 mm.

Posteriormente, após o período chuvoso, os geofones registraram um aumento na velocidade da onda S de cerca de 4% até outubro de 2021. Apesar disso, algumas variações de velocidade foram observadas devido a eventos de chuva isolados, com precipitações de até 20 mm. Ainda assim, o volume de chuva registrado não foi suficiente para causar uma redução significativa na velocidade da V_s . No entanto, um dos geofones não apresentou o mesmo ganho de velocidade observado nos demais.

Entre outubro de 2021 e fevereiro de 2022, os geofones apresentaram uma tendência geral de queda de 4% na velocidade, com variações entre 2% e 4%, dependendo dos níveis de precipitação. Por exemplo, entre dezembro e fevereiro, o volume de chuva chegou a aproximadamente 110 mm. Durante esse período, os geofones registraram quedas mais significativas na velocidade (cerca de 2,5%). No entanto, entre outubro e novembro, quando a precipitação foi em torno de 70 mm, os geofones indicaram uma diminuição menor na velocidade da onda S (V_s), de aproximadamente 1,5%.

Após esse intervalo, houve um ganho na velocidade da onda S de cerca de 4,2% até outubro de 2022, com algumas pequenas quedas de aproximadamente 0,5% causadas por dias isolados de chuva. Durante esse período, a precipitação máxima registrada foi de 40 mm, com média de 10 mm. De outubro de 2022 a fevereiro de 2023, os geofones indicaram uma queda geral de 2,5% na velocidade, coincidindo com os dias mais chuvosos desse intervalo. No entanto, entre outubro e novembro, os níveis de precipitação variaram entre 0 e 25 mm, e a V_s praticamente não apresentou variação. Contudo, quando a precipitação alcançou 80 mm, a velocidade da onda S (V_s) iniciou uma trajetória de queda, que se prolongou até fevereiro.

Após esse período, as velocidades registradas pelos geofones apresentaram pouca variação, com ganhos de aproximadamente 1,5% até novembro de 2023, já que esse foi um período com baixos índices de chuva. De novembro de 2023 a fevereiro de 2024, os geofones registraram uma redução na velocidade da onda S de cerca de 0,5%, coincidindo com o início da estação chuvosa, que apresentou níveis de precipitação superiores aos do período anterior. Vale destacar que, de fevereiro de 2023 a fevereiro de 2024, de modo geral, os valores de V_s praticamente não apresentaram variação, o que pode estar associado à perda de sinal de alguns geofones durante esse período. É importante ressaltar que, mesmo em períodos chuvosos, nos dias com menor precipitação, a velocidade da onda S (%) não diminui tanto quanto nos dias com volumes de chuva mais elevados (mm).

Segundo Olivier et al. (2017), as variações na velocidade sísmica em barragens de rejeitos são influenciadas por mudanças no estado de tensões no interior do maciço, níveis de saturação, impactos físicos no corpo da barragem e alterações na pressão de poros.

De acordo com Breton et al. (2021), um aumento no tempo de chegada das ondas S entre um par de sensores indica uma redução na velocidade de propagação da onda no meio monitorado, o que sugere que o material pode estar perdendo rigidez.

Nesse contexto, os resultados obtidos demonstram uma correlação clara entre a redução na velocidade de propagação das ondas S e o aumento das chuvas. As quedas mais significativas na velocidade foram observadas entre os meses de outubro e fevereiro, que correspondem ao período de maior volume de precipitação na região onde a barragem está

localizada. Essa relação evidencia como o aumento das chuvas provavelmente eleva os níveis de saturação no corpo da barragem, alterando suas propriedades mecânicas e reduzindo sua rigidez

É importante destacar que as variações na velocidade podem ser influenciadas por outros fatores além da precipitação de chuvas. Esses fatores podem incluir mudanças na distribuição de tensões, variações de temperatura ou heterogeneidades locais no material, que também podem contribuir para os padrões de velocidade observados.

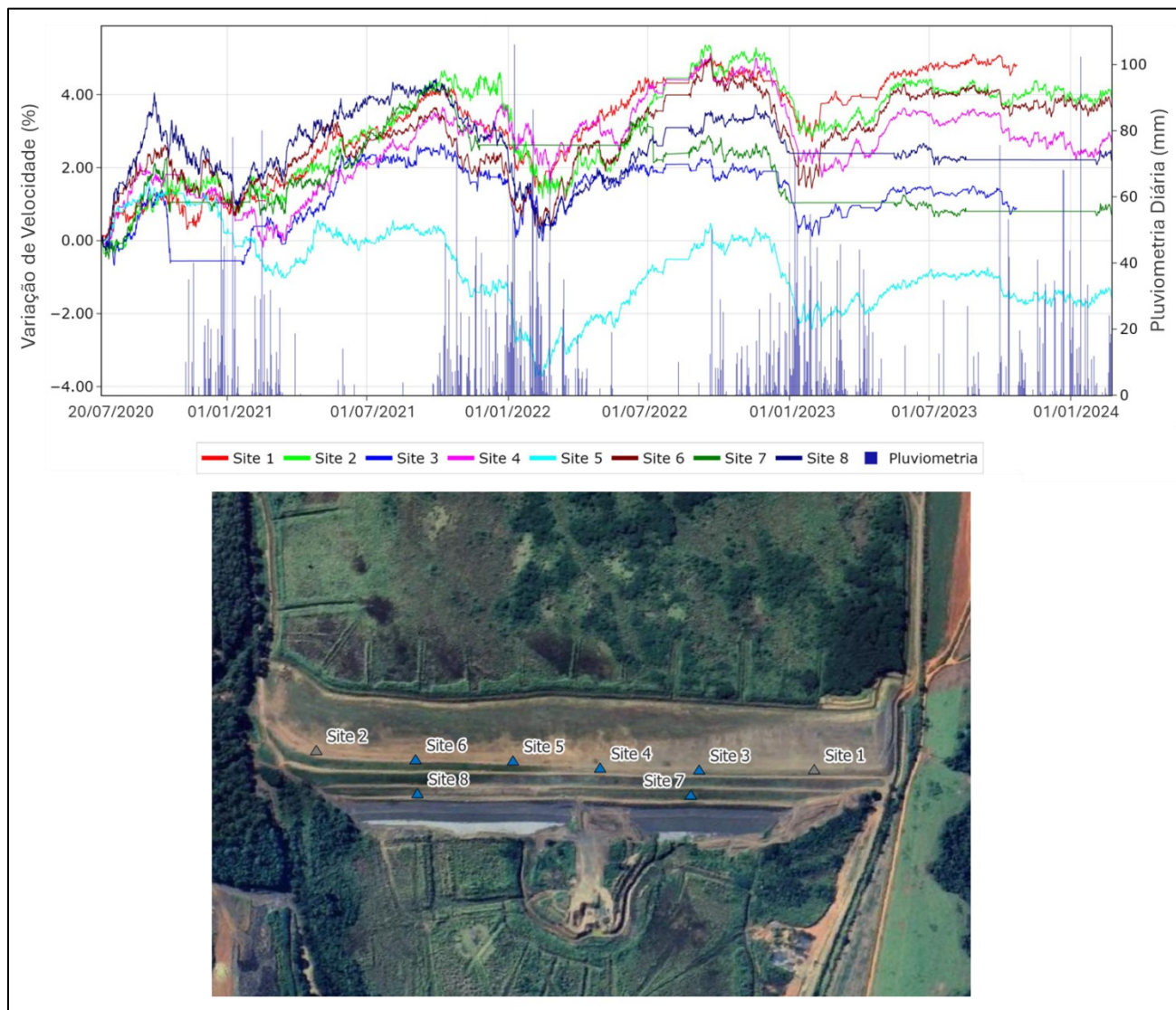


Figure 5 – Histórico da variação de velocidade da V_s registrado por cada geofone durante o período de monitoramento entre julho de 2020 e fevereiro de 2024. Geofones 1 e 2 são triaxiais e geofones 3 a 8 são uniaxiais.

Fonte: Autores (2025).

4.2. Eletorresistividade (ER)

Os perfis de eletorresistividade permitiram investigações em profundidades de aproximadamente 50 metros. Os dados coletados permitiram diferenciar as anomalias de resistividade alta, baixa e intermediária, que foram categorizadas conforme sua magnitude (Figura 6). As Zonas de Alta Resistividade (ZAR), com valores acima de 371 ohm.m, foram interpretadas como zonas secas, enquanto as Zonas de Baixa Resistividade (ZBR), com valores abaixo de

aproximadamente 56 ohm.m, foram correlacionadas com regiões de alta umidade. As Zonas de Resistividade Intermediária (ZRI) representaram áreas com valores de resistividade situados entre esses limites.

As seções L-01 a L-03, localizadas na área da praia de rejeitos, apresentaram valores baixos de resistividade, indicando um ambiente com maior teor de umidade. A presença de zonas de baixa resistividade nessa região sugere que o acúmulo de água na praia de rejeitos pode impactar as camadas superficiais.

As seções L-04 a L-09, situadas na região do corpo da barragem, mostraram uma menor predominância de valores de baixa resistividade. Nas camadas superficiais, observou-se uma maior concentração de valores de resistividade intermediários a altos, distribuídos de forma contínua. Logo abaixo, zonas condutivas se estendem em profundidade, formando padrões subverticais. Em maiores profundidades, ocorre um aumento gradual na resistividade, com variações perceptíveis entre zonas de diferentes características geofísicas.

As seções L-10A, L-11A, L-12A, L-10B, L-11B e L-12B, localizadas no pé da barragem, apresentaram características geofísicas semelhantes. As seções iniciais ("A") apresentam um horizonte subsuperficial com resistividade variando de baixa a intermediária. Abaixo desse nível, identifica-se uma zona altamente condutiva que, à medida que a profundidade aumenta, gradualmente há ocorrência de materiais com resistividade mais elevada. Nas seções "B", observa-se uma predominância de valores baixos de resistividade desde as camadas superficiais até maiores profundidades, com uma transição abrupta para zonas altamente resistentes a partir da porção central até o final dos perfis.

As seções L-13 a L-18, dispostas perpendicularmente ao eixo da barragem, apresentaram um horizonte condutivo superficial que se estende em profundidade nas partes iniciais dos perfis. Anomalias resistentes localizadas surgem dentro dessa camada em algumas seções. A região central é caracterizada por uma camada subsuperficial resistente sobre uma zona condutiva descontínua, que se torna mais resistente em maiores profundidades. Nas porções finais dos perfis, próximas ao lado jusante da barragem, predominam valores baixos de resistividade, exceto na seção L-18, que apresenta valores altos de resistividade em todo o trecho final.

Com base nos dados de eletrorresistividade adquiridos e nas suas respectivas assinaturas no contexto das estruturas existentes da barragem, foi possível identificar os prováveis materiais presentes na área e discutir suas possíveis condições de umidade.

Após a definição dos valores característicos de resistividade para as Zonas de Baixa Resistividade (ZBR), foi realizada a modelagem implícita das chamadas "Zonas de Maior Umidade". Essas zonas correspondem a áreas com maior concentração de valores baixos de resistividade, caracterizadas por maior persistência e continuidade entre seções geofísicas adjacentes, indicando a possível presença de umidade nos poros e/ou conteúdo argiloso. A distribuição, forma e continuidade das anomalias condutivas foram fundamentais para definir o intervalo associado a essas "Zonas de Maior Umidade", que foi estabelecido entre 0 e 41 ohm.m.

As regiões com resistividade entre 0 e 41 ohm.m foram identificadas na área da praia de rejeitos, apresentando continuidade lateral ao longo do eixo da barragem e maior profundidade na região da Barragem B4, atingindo aproximadamente 45 metros. Próximo à interseção com a ombreira direita dessa mesma barragem, há uma área com profundidades variando entre 10 e 15 metros. Outra área, também dentro da Barragem B4, atinge profundidades de 28 a 33 metros na crista, estendendo-se em direção à jusante. Uma terceira região, ainda na Barragem B4, apresenta profundidade máxima de 45 metros na crista e variações entre 11 e 17 metros próximo ao dreno de pé. Além disso, foram identificadas anomalias a jusante das barragens B4 e B1, sendo que a anomalia a jusante da B1 foi observada em campo.

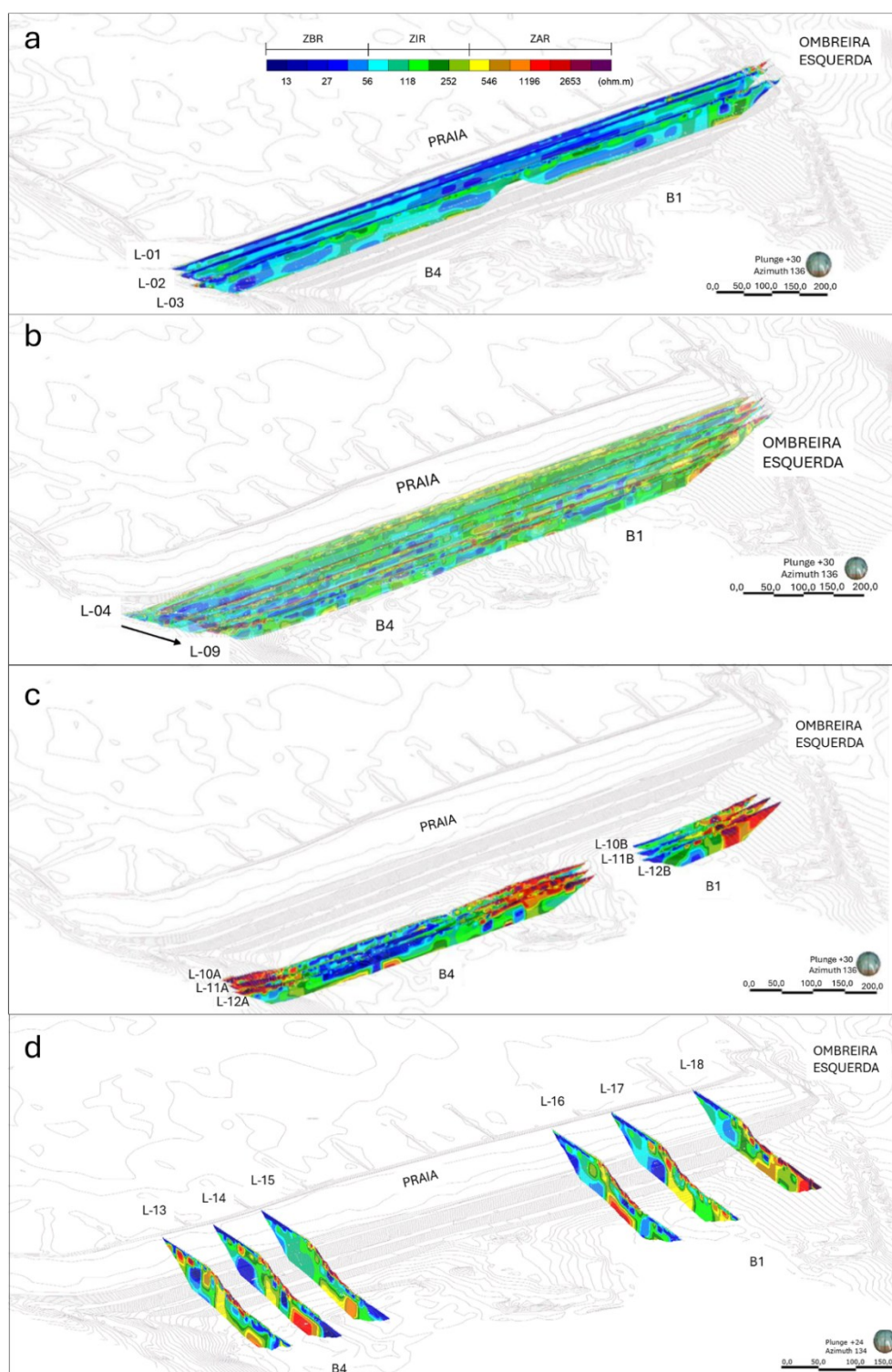


Figura 6 – Representação das seções de eletroresistividade obtidas. a) Seções L-01 a L-03 b) Seções L-04 a L-09 c) Seções L-10A a L-12B d) Seções L-13 a L-18.

Fonte: Autores (2025).

A Figura 7 ilustra as "Zonas de Maior Umidade" modeladas no contexto das principais estruturas da barragem, como o dique de partida, tapete drenante e o dreno de pé. A análise revela que os drenos de pé, o tapete drenante e as regiões superiores da Barragem B1B4 estão localizados em áreas condutivas (ZBR), provavelmente associadas à umidade local. Esse comportamento é corroborado por observações de campo, nas quais uma maior concentração de água na região a jusante do corpo da barragem coincide com as zonas de maior condutividade identificadas nas seções de Eletroresistividade (ER).

Abaixo do dreno de pé, na fundação, observa-se uma tendência de aumento nos valores de resistividade (superiores a 118 ohm.m), com características morfológicas contínuas observadas em diversas seções. Esse padrão geofísico é visível na base da estrutura de drenagem e fornece uma assinatura clara dessa transição. Abaixo dessas áreas, nota-se novamente um aumento nos valores de resistividade aparente (acima de 118 ohm.m), provavelmente associado ao material da fundação, onde os níveis de umidade são mais baixos (Figura 8).

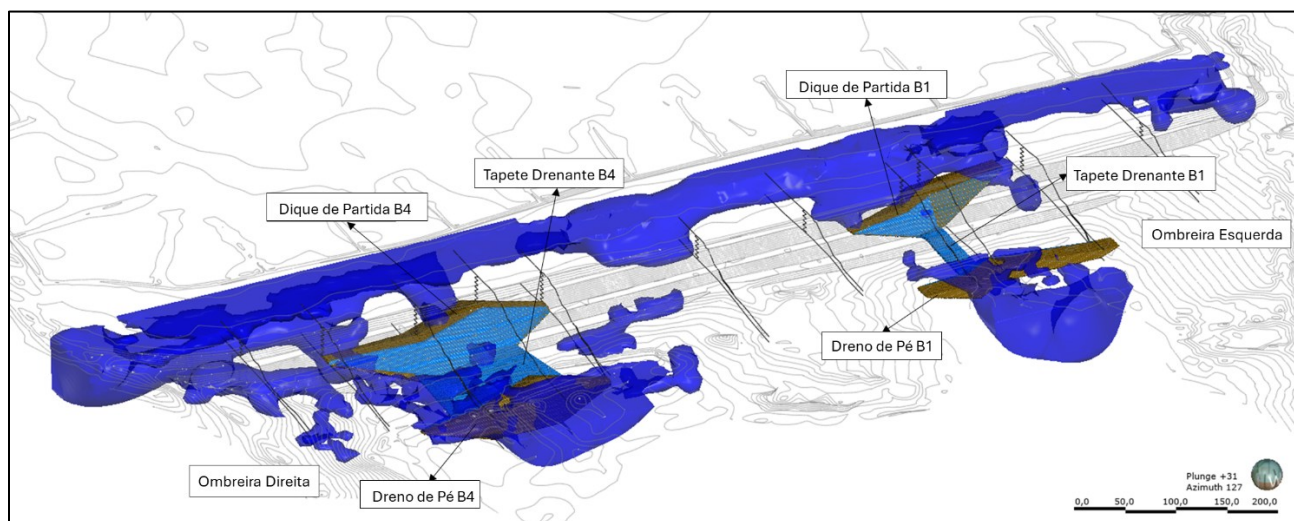


Figura 7 – Representação das “Zonas de Maior Umidade” no contexto da Barragem B1B4 baseada nos dados de eletroresistividade e correlacionada com os diques de partida, drenos de pé e tapetes drenantes.

Fonte: Autores (2025).

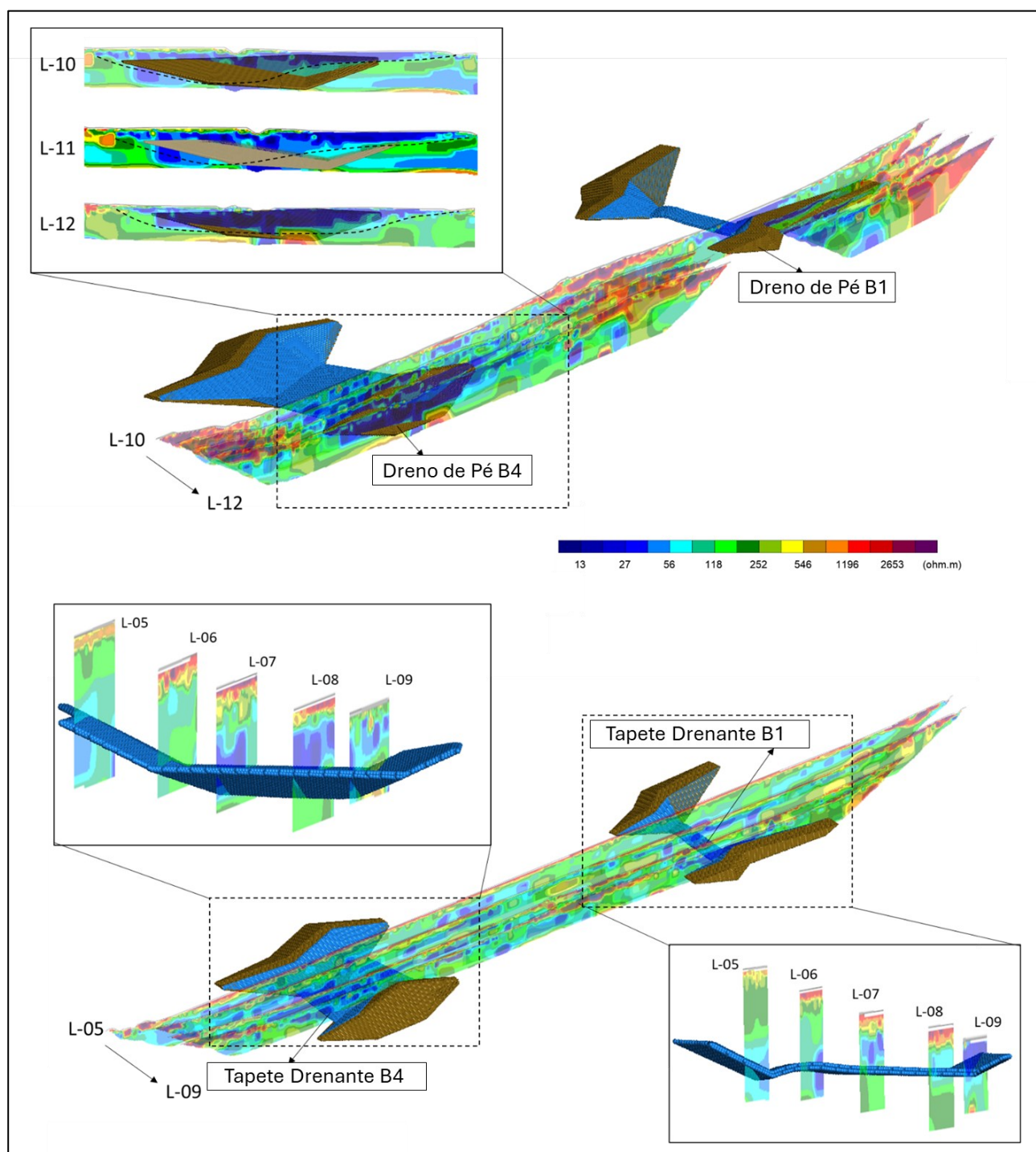


Figure 8 – Correlação entre a eletrorresistividade e o tapete drenante e dreno de pé.

Fonte: Autores (2025).

Foi observada uma redução na velocidade da onda S (V_s) durante o monitoramento por ISRA, entre julho e setembro de 2020, que pode estar possivelmente associada a áreas identificadas como de alta condutividade nos perfis de eletrorresistividade nesse mesmo período. Essas áreas, localizadas nos drenos de pé, no tapete drenante e na praia de

rejeitos, coincidem com as "Zonas de Maior Umidade" modeladas com base em valores baixos de resistividade (<56 ohm.m) provenientes dos dados de Eletorresistividade (ER). A diminuição observada na velocidade da onda S é compatível com a menor rigidez dos materiais em regiões com alta umidade nos poros e/ou conteúdo argiloso, conforme indicado pelas anomalias condutivas.

A correlação entre os dois métodos reforça a relação entre as propriedades mecânicas e as assinaturas geofísicas dos materiais da barragem. As zonas condutivas identificadas pelo método de eletorresistividade não apenas validaram a distribuição de umidade inferida a partir das variações de velocidade sísmica, como também forneceram uma caracterização espacial detalhada dessas áreas, destacando sua continuidade e conexão com as estruturas da barragem. Esses resultados demonstram a natureza complementar dos dois métodos, em que as medições de resistividade oferecem uma localização e classificação das zonas de umidade, enquanto a interferometria sísmica fornece informações dinâmicas sobre as mudanças mecânicas no corpo da barragem ao longo do tempo.

5. Considerações Finais

Durante o período analisado, os dados de interferometria sísmica de ruído ambiente indicaram uma tendência cíclica nas variações da velocidade da onda S (V_s %). Entre os meses de outubro e fevereiro, quando os níveis de precipitação são mais elevados, observam-se quedas mais acentuadas na V_s . Por outro lado, entre fevereiro e outubro, período caracterizado por menores índices de chuva, é observada uma recuperação da V_s , sugerindo um ganho de rigidez na barragem.

Além disso, foi observado que a inflexão na velocidade da onda S (V_s), no início do monitoramento microssísmico entre julho e setembro, pode estar relacionada às áreas de alta condutividade identificadas nos drenos de pé, no colchão drenante e na praia de rejeitos por meio das medições de eletorresistividade.

A correlação entre baixa resistividade e baixa velocidade da onda S (V_s) mostrou-se essencial para a identificação de regiões atípicas na barragem, como áreas com maior teor de umidade. Ao integrar os dados da interferometria sísmica de ruído ambiente com as medições de eletorresistividade, foi possível adotar uma abordagem abrangente para o monitoramento das variações nas propriedades físicas da barragem.

Esse estudo reforça a importância do monitoramento geofísico contínuo como ferramenta complementar à instrumentação convencional, contribuindo para uma avaliação preventiva da barragem e gestão de riscos geotécnicos associados.

Referências

- ALMEIDA, F. D.; HASUI, Y.; BRITO NEVES; B. D.; FUCK, R. A. Províncias estruturais brasileiras. In: *Simpósio de Geologia do Nordeste*, 1977, Campina Grande, v. 8, p. 363-391, 1977.
- AZAM, S., LI, Q. Tailings Dam Failures: A review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, v. 28, n. 4, p. 50–54, 2010.
- BRAGA, M.A.; GAMA, M.F. Advancements in geophysical monitoring of tailings dams: Integrating geophysical methods with geotechnical instrumentation for improved safety and environmental management. In: *International Workshop on Gravity, Electrical & Magnetic Methods and Their Applications, Shenzhen, China*. Society of Exploration Geophysicists and Chinese Geophysical Society, p. 7-10, 2024.
- BRETON, M. L.; BONTEMPS, N.; GUILLEMOT, A.; BAILLET, L.; LAROSE, É. Landslide monitoring using seismic ambient noise correlation: challenges and applications. *Earth-Science Reviews*, v. 216, p. 103518, 2021.
- CAMARERO, P.L.; MOREIRA, C.A. Geophysical investigation of earth dam using the electrical tomography resistivity technique. *REM-International Engineering Journal*, v. 70, p. 47-52, 2017.
- CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – uma revisão. *Holos*, v. 8, n. 32, p. 77-85, 2016.
- CURTIS, A.; GERSTOFT, P.; SATO, H.; SNIEDER, R.; WAPENAAR, K. Seismic Interferometry-turning noise into signal. *The Leading Edge*, v. 25, n. 9, p. 1082–1092, 2006.

-
- DAHLIN, T.; ZHOU, B. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, v. 52, n. 5, p. 379-398, 2004.
- DIAS, L. S. O.; BRAGA, M. A.; CUNHA, A. S.; OLIVIER, G.; MACHADO, D.M. 2022. Mining Induced Ground Motions in a Tailings Dam. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 45, p. 1-12, 2022.
- ESPÓSITO, T.J.; DUARTE, A. P. Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais em relação a fatores de risco. *Rem: Revista da Escola de Minas*, v. 63, n. 2, p. 287-295, 2010.
- FREITAS, I. V. L. D.; SANTOS, H. A. E. The relationship between geophysical and geotechnical data: a temporal analysis of an iron ore tailings dam. *Soils and Rocks*, v. 47, n. 4, p. e2024011923, 2024.
- HARIRI-ARDEBILI, M. A. Risk, Reliability, Resilience (R3) and beyond in dam engineering: A state-of-the-art review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 31, p. 806-831, 2018.
- HUSSAIN, Y.; MARTINEZ-CARVAJAL, H.; CÁRDENAS-SOTO, M.; UAGODA, R.; MARTINO, S.; HUSSAIN, M. B. Microtremor response of a mass movement in Federal District of Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 40, n. 3, p. 212-221, 2017.
- JÁCOMO, M. H.; BROD, T. C. J.; PIRESA, A. C. B.; BRODA, J. A., PALMIERIC, M.; FERRAR, A. J. D. Associação de magnetometria, gamaespectrometria, geoquímica e petrografia para modelamento tridimensional da mineralização de nióbio do depósito Morro do Padre, Goiás, Brasil. In: *IV Simpósio Brasileiro de Geofísica*. European Association of Geoscientists & Engineers, p. cp-197-00061, 2010.
- 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.
- LOKE, M.H.; CHAMBERS, J.E.; RUCKER, D.F.; KURAS, O.; WILKINSON, P.B. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, v. 95, p. 135-156, 2013.
- MAINALI, G.; NORDLUND, E.; KNUTSSON, S.; THUNEHED, H. Tailings dams monitoring in Swedish mines using self-potential and electrical resistivity methods. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 20, n. 13, p. 5859-5875, 2015.
- MARTINEZ-PAGAN, P.; GÓMEZ-ORTIZ, D.; MARTÍN-CRESPO, T.; MARTÍN-VELÁZQUEZ, S.; MARTINEZ-SEGURA, M. Electrical resistivity imaging applied to tailings ponds: an overview. *Mine Water and the Environment*, v. 40, n. 1, p. 285-297, 2021.
- MARTINI, R.J.; CAETANO, T.R.; SANTOS, H.A.; ARANHA, P.R.A. Deposição de rejeitos de minério de ferro em reservatórios: uma aplicação do método GPR. *Revista Ambiente & Água*, v. 11, n. 4, p. 878-890, 2016.
- MENDES, N. B. Um estudo de propagação de ondas e lançamento do sismo na análise dinâmica acoplada barragem em arco -reservatório -fundação. 289 p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) — Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- MOLLEHUARA-CANALES, R.; KOZLOVSKAYA, E.; LUNKKA, J. P.; MOISIO, K.; PEDRETTI, D. Non-invasive geophysical imaging and facies analysis in mining tailings. *Journal of Applied Geophysics*, v. 192, p. 104402, 2021.
- NIKONOW, W.; RAMMLMAIR, D.; FURCHE, M. A multidisciplinary approach considering geochemical reorganization and internal structure of tailings impoundments for metal exploration. *Applied geochemistry*, v. 104, p. 51-59, 2019.
- OLIVEIRA, L. A.; BRAGA, M. A.; PROSDOCIMI, G.; DE SOUZA CUNHA, A.; SANTANA, L., & DA GAMA, F. Improving tailings dam risk management by 3D characterization from resistivity tomography technique: Case study in São Paulo–Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, v. 210, p. 104924, 2023.
- 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.

-
- PANKOW, K.L.; MOORE, J.R.; HALE, J.M.; KOPER, K.D.; KUBACKI, T.; WHIDDEN, K.M.; MCCARTER, M.K. Massive landslide at Utah copper mine generates wealth of geophysical data. *Gsa Today*, v. 24, n. 1, p. 4-9, 2014.
- 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.
- RESENDE, LINCOLN RIBEIRO MAIA DE; OLIVEIRA FILHO, WALDYR LOPES DE; NOGUEIRA, CHRISTIANNE DE LYRA. Use of the DCP test for compaction control of staged dikes in mining tailings dams. *Rem: Revista da Escola de Minas*, v. 66, n. 4, p. 493-498, 2013.
- 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.
- SCHUSTER, G. T. Seismic Interferometry. In: *Encyclopedia of Exploration Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, 2014. p. Q1–1–Q1–41 doi:10.1190/1.9781560803027.entry5
- SILVEIRA, I. V. DA; PEDROSO, L. J. Analysis of natural frequencies and modes of vibration involving interaction dam-reservoir-foundation for concrete gravity dams. In: *Third International Dam World Conference*, p. 11, 2018.
- SILVEIRA, I. V. DA; PEDROSO, L. J.; MAROTTA, G. S. Study of the influence of the foundation and the reservoir on the dynamic response in a concrete gravity dam profile. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 4, p. e14403, 2021.
- 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.