

CORRELAÇÃO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS COM OBRA DE REFORÇO EM UMA BARRAGEM DE REJEITO DE MINERAÇÃO – CATALÃO, GO

Gilvan Sá¹, Anne Karine Nunes da Mata², Marco Antônio Braga³, Ewerton Rodrigues⁴, Thiago Oliveira⁵

Resumo – Barragens de mineração são estruturas projetadas para a disposição de materiais provenientes do processo mineral. Para garantir a segurança dessas estruturas, é comum a realização de monitoramentos geotécnicos contínuos, por meio de inspeções visuais e instrumentações, sejam elas manuais ou automatizadas. No entanto, esse processo demanda tempo e planejamento para o processamento e interpretação dos dados. Assim, os métodos geofísicos surgem como ferramentas complementares, oferecendo maior cobertura e agilidade na aquisição de informações. Este trabalho tem como objetivo apresentar a aplicação integrada dos métodos de eletrorresistividade e da interferometria sísmica do ruído ambiente como suporte ao monitoramento geotécnico da Barragem Br. Com a eletrorresistividade, foi possível mapear zonas de baixa resistividade associadas a áreas com maior grau de umidade. Já a interferometria sísmica do ruído ambiente, possibilitou o monitoramento em tempo real da variação da velocidade da onda S (V_s), onde foi verificado uma perda até 11%, na região da crista da barragem, associado a área de maior umidade próximo a ombreira direita e contribuição do período chuvoso. O método MASW confirmou a redução da velocidade da onda S (V_s), apresentando uma correlação com as áreas de maior umidade previamente identificadas por meio da eletrorresistividade. Além disso, a interferometria sísmica possibilitou observar a recuperação gradual da V_s . A integração dos métodos geofísicos permitiu identificar anomalias e adotar medidas de engenharia corretivas, colaborando para a segurança operacional da barragem monitorada.

Abstract – Mining tailings dams are structures designed for the disposal of materials derived from mineral processing. To ensure the safety of these structures, continuous geotechnical monitoring is commonly performed through visual inspections and instrumentation, whether manual or automated. However, this process requires time and careful planning for data processing and interpretation. In this context, geophysical methods emerge as complementary tools, offering broader coverage and faster data acquisition. This study aims to present the integrated application of electrical resistivity and ambient noise seismic interferometry methods as support tools for the geotechnical monitoring of the Br Dam. Electrical resistivity was employed to map low-resistivity zones associated with areas of higher saturation. Meanwhile, ambient noise seismic interferometry enabled real-time monitoring of variations in S-wave velocity (V_s), with reductions reaching 11% at the dam crest. The MASW method confirmed the reduction in S-wave velocity (V_s), showing a correlation with the higher saturation zones previously identified through electrical resistivity. Furthermore, seismic interferometry allowed for the observation of the gradual recovery of V_s . The integration of geophysical methods proved effective in identifying anomalies and supporting corrective engineering measures, thus contributing to the operational safety of the monitored dam.

Palavras-Chave – Eletrorresistividade, Interferometria Sísmica do Ruído Ambiente, Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)

1. INTRODUÇÃO

As barragens de rejeito são estruturas de contenção para armazenar resíduos produzidos durante o período de beneficiamento de uma mina. Essas estruturas possuem três tipos de métodos construtivos, sendo pelo método à montante, jusante e 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, em que todas as barragens existentes construídas com esse método foram proibidas de operar, com prazos legais definidos para o processo de descaracterização.

O monitoramento de barragens de rejeito comumente é realizado por inspeções visuais e instrumentação geotécnica, com a utilização de piezômetros e indicadores de nível de água (INA). No entanto, técnicas de monitoramento complementares, como monitoramento por métodos geofísicos, oferecem um complemento à investigação dos parâmetros físicos da estrutura, pois permitem a obtenção de um volume significativo de dados em menor prazo e possibilitam a avaliação de áreas extensas da barragem.

Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivo apresentar e correlacionar os resultados do método de interferometria sísmica do ruído ambiente, MASW e eletrorresistividade, visando demonstrar a eficácia da integração desses métodos na caracterização não invasiva de estruturas de contenção, contribuindo para uma análise contínua das variações nas propriedades físicas ao longo do tempo.

Essas análises foram realizadas ao longo das obras de reforço de uma barragem permitindo uma compreensão dos resultados decorrentes da obra ao longo do desenvolvimento do projeto.

2. ÁREA DE ESTUDO

A Barragem BR (Figura 1) faz parte do Complexo Minerquímico de Catalão e está situada na cidade de Catalão, no estado de Goiás. Ao longo de sua operação, a barragem passou por quatro etapas de construção para atender às demandas do processo industrial. Nos alteamentos, foi utilizada uma combinação de métodos de linha de centro e a montante.

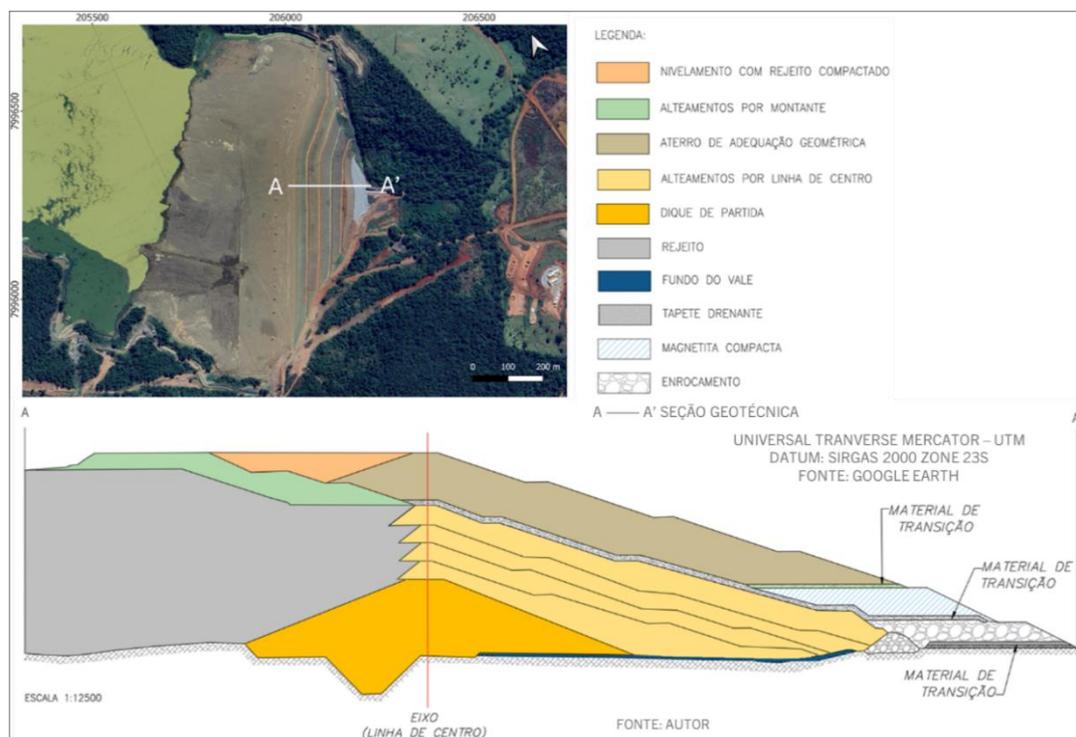


Figura 1. Representação esquemática dos principais componentes da barragem e uma seção transversal representativa detalhando os materiais constituintes do aterro.

Durante os anos de 2020 a 2021, a barragem passou por um processo de reforço (Figura 1) a fim de atender a legislação em vigor. O projeto de reforço basicamente foi dimensionado e implementado com a substituição de solos moles presentes a jusante por enrocamento a fim de melhorar as condições de suporte. A partir desta camada de enrocamento a sequência construtiva passou por aterros com utilização de magnetita e rejeitos do próprio processo de beneficiamento. Também contou com camadas transicionais (Figura 2) com granulometrias ajustadas aos requisitos e critérios de projeto, incluindo brita 3, brita 0 e areia (Sá et al., 2025).

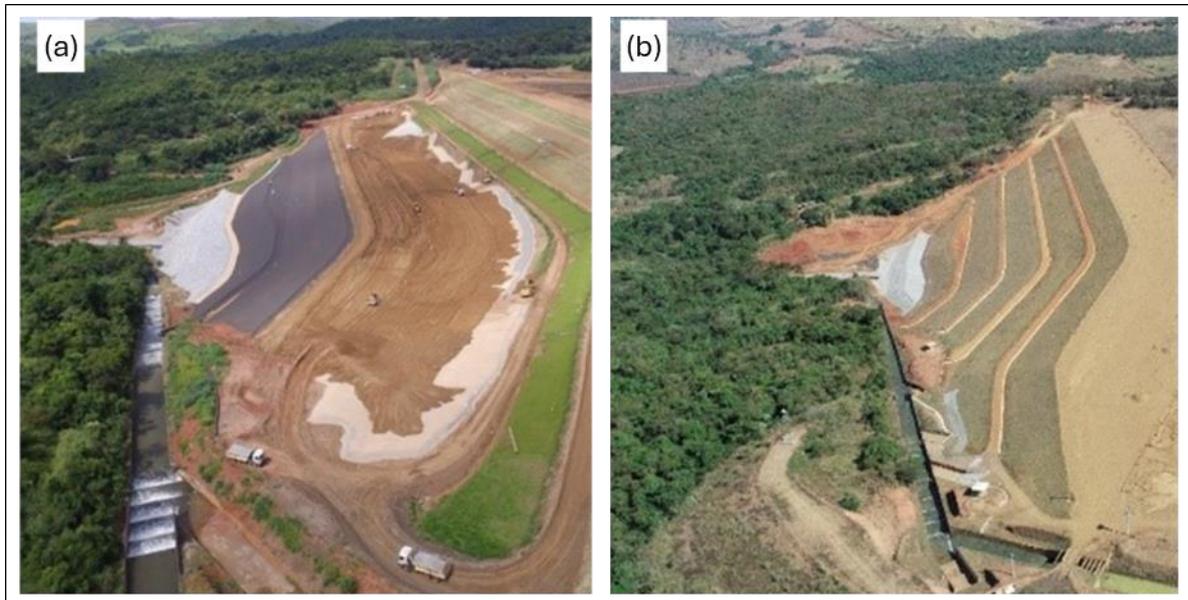


Figura 2. Etapas da construção da barragem. (a) Diferentes etapas da construção com aplicação de materiais de transição. (b) Etapa final da obra após a conclusão do reforço.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a segurança estrutural da barragem, foram empregados métodos geofísicos de monitoramento, incluindo eletrorresistividade, microssísmica, abrangendo a interferometria sísmica de ruído ambiente, e o método de MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*). Esses métodos foram aplicados com foco na ombreira direita do maciço, com o objetivo de investigar zonas com alta umidade, e detectar possíveis anomalias geotécnicas.

3.1. INTERFEROMETRIA SÍSMICA DO RUÍDO AMBIENTE

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). Segundo Wapenaar et al. (2010), esse método consiste na correlação cruzada entre sinais registrados por diferentes receptores, possibilitando a extração de uma resposta equivalente a de um sinal impulsivo entre os pontos analisados. Com isso, torna-se possível observar variações na velocidade das ondas S (VS). Tal abordagem fornece, assim, um meio de detecção e em tempo real de mudanças físicas no interior da estrutura.

A rigidez pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo variações na pressão intersticial, processos de carregamento mecânico, desenvolvimento de cisalhamento e até mecanismos de erosão interna. Alterações nessas condições impactam diretamente a propagação das ondas de cisalhamento (S), de modo que o aumento no tempo de chegada dessas ondas é interpretado como uma redução da velocidade, o que por sua vez sugere uma diminuição da rigidez do material.

Essa relação está associada ao comportamento do cisalhamento em meios sólidos. Segundo Breton et al. (2021), a velocidade das ondas S (V_s) depende diretamente do módulo de rigidez (G) e da densidade do material (ρ), conforme a expressão:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Dessa forma, a variação observada em V_s pode ser interpretada como indicativo de modificações na estrutura mecânica do maciço, refletindo alterações no seu estado de tensões ou nas suas condições físicas internas.

Nesse estudo, o sistema de monitoramento microssísmico foi projetado para cobrir toda a região da barragem, considerando seu histórico de alteamento, obras de adaptação e estruturas de drenagem interna.

Segundo Sá et al (2025), a instalação foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa, na cota 778,00m, foram instalados 6 geofones na crista da barragem, sendo os geofones 1 e 2 triaxiais e 3 a 6 uniaxiais. Na segunda etapa, após a conclusão das fases de adaptação, envolvendo a aplicação de material rochoso (enrocamento) na cota 730,00m e o aterro com magnetita até a cota 778,00m, o sistema de monitoramento microssísmico foi projetado para cobrir todo o maciço da barragem. Na cota 740,00m, foram instalados 2 geofones uniaxiais nas bermas intermediárias, sendo denominados como geofone 7 e 8 (Figura 3).

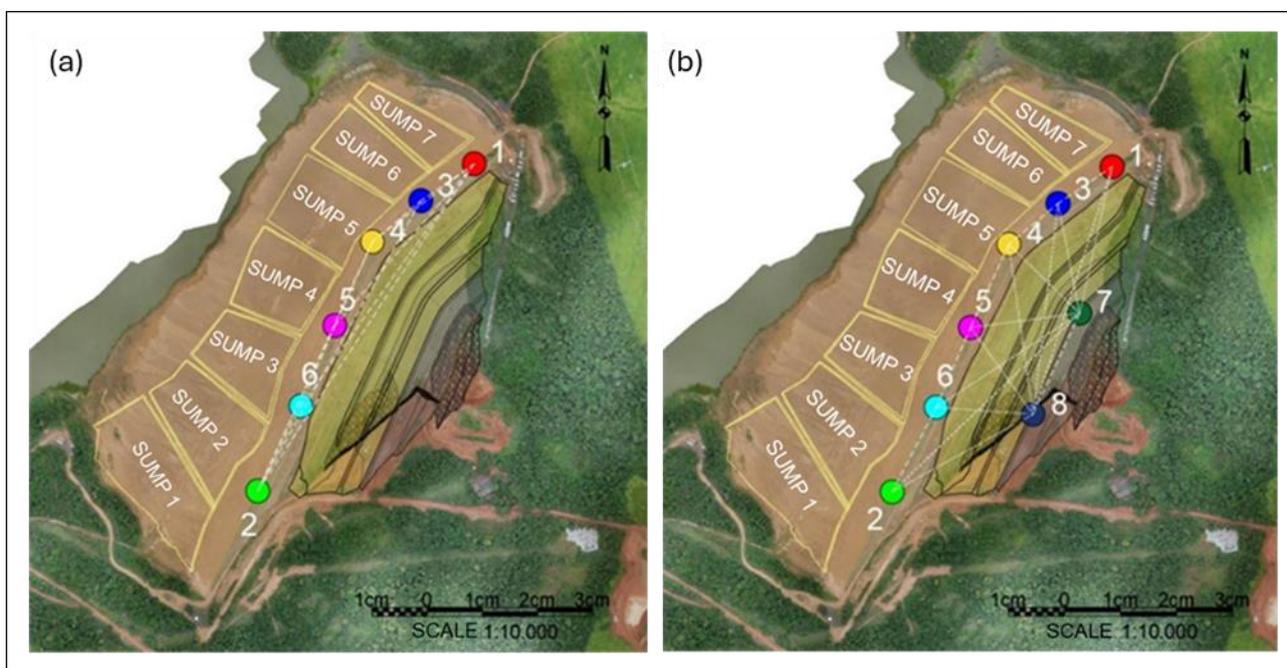


Figura 3. Geofones + Sumps – (a) Primeira etapa (b) Segunda etapa.

3.2. MASW

De acordo com Eikmeier et al. (2014), o método MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) baseia-se no comportamento dispersivo da onda Rayleigh ao se propagar em um meio verticalmente heterogêneo, onde diferentes comprimentos de onda percorrem diferentes pacotes de camadas em subsuperfície. À medida que essas ondas se propagam, diferentes faixas de comprimento de onda interagem com camadas distintas do subsolo, sendo influenciadas pelas propriedades elásticas específicas de cada uma. Como resultado, a velocidade de propagação das ondas sofre variações que estão diretamente associadas à rigidez e densidade dos materiais presentes ao longo do perfil vertical do terreno.

Esse método consiste na aquisição de dados sísmográficos multicanal para registrar a propagação de ondas geradas por uma fonte sísmica, como um martelo ou explosivo controlado. A análise dessas ondas permite a obtenção de perfis de velocidade de ondas de cisalhamento (V_s), que são essenciais para a caracterização geotécnica do solo, a identificação de camadas subsuperficiais e a avaliação de potenciais zonas de fraqueza ou instabilidade.

Em julho de 2021, quatro seções sísmicas foram adquiridas a jusante da barragem utilizando 24 geofones espaçados em 5 metros, de modo que esse método foi utilizado para estimar a velocidade das ondas de cisalhamento (V_s), o que auxilia na avaliação da rigidez do solo. As aquisições foram feitas ao longo de perfis na crista e ombreira direita, antes e depois de intervenções operacionais, como a realocação de *sumps* (Sá et al., 2024).

3.3. ELETORRESISTIVIDADE

A eletrorresistividade é um método geofísico que tem como base a medição da resistividade elétrica dos materiais do subsolo (Telford et al., 1990). Essa técnica pode ser aplicada por meio de diferentes procedimentos de aquisição, como a sondagem elétrica vertical, o caminhamento elétrico e a perfilagem elétrica. No presente estudo, optou-se pela utilização do caminhamento elétrico, que consiste na injeção de corrente elétrica no terreno através de dois eletrodos de corrente com o objetivo de medir as diferenças de potencial geradas entre outros dois pares de eletrodos de potencial, assim sendo possível identificar regiões em subsuperfície que apresentam maior ou menos resistividade (Lago et al., 2006). Essa metodologia permite identificar variações na resistividade do subsolo, associadas a mudanças nas propriedades litológicas, estruturais e hidrogeológicas dos materiais.

A aquisição dos dados pode ser realizada utilizando distintos tipos de arranjo de eletrodos, como Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo, polo-dipolo, polo-polo e gradiente, cada um com características específicas de resolução e profundidade investigativa.

Durante a campanha de 2020, foram executados 23 perfis de eletrorresistividade ao longo da Barragem BR, cobrindo regiões do maciço da barragem, da praia e das ombreiras. As medições foram realizadas com o equipamento SpertSing, configurado com espaçamento de 4 metros entre eletrodos, arranjo do tipo dipolo-dipolo e utilização de 84 canais ativos. Essa configuração possibilitou a investigação de profundidades variando entre 40 e 85 metros, fornecendo subsídios para o mapeamento de anomalias condutivas e contrastes elétricos relevantes à interpretação geotécnica da estrutura (Sá et al., 2023).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Entre outubro de 2020 e julho de 2021, foi realizado o monitoramento da velocidade da onda S (V_s) através da técnica de interferometria sísmica de ruído ambiente (Figura 4). Durante esse período, foi observada uma tendência de redução progressiva nas curvas de variação percentual da velocidade ($dv/v\%$) nos pontos de monitoramento distribuídos ao longo da barragem. Os maiores decréscimos foram registrados nos geofones 2, 5 e 6, localizados na região da ombreira direita, com perdas de até 11%, evidenciando zonas com maior influência do aumento do teor de umidade (Sá et al., 2025).

O geofone 5, registrou a maior redução, atingindo aproximadamente 11%, seguido pelos geofones 2 e 3, ambos com reduções em torno de 10%. regiões coincidiram com as áreas onde foram realizadas operações de espigotamento de rejeitos na crista da barragem. Concomitante a estas operações de espigotamento teve também uma contribuição do período chuvoso, com picos de precipitação superiores a 100mm. A combinação das operações de espigotamento nos *sumps* 1, 2 e 3 próximo a ombreira direita com período chuvoso contribuiu com aumento da umidade do meio nessa região da barragem, influenciando na redução da V_s .

A redução da velocidade da Vs pode ser interpretada como uma diminuição temporária na rigidez dinâmica do maciço, possivelmente relacionada à elevação do teor de umidade ou a redistribuições internas de esforços devido às intervenções construtivas. Em resposta a esses dados, as operações de espigotamento foram realocadas para *sumps* posicionados na ombreira esquerda (*sumps* 5, 6 e 7), região que apresentou comportamento mais estável. A partir de julho de 2021, foi observada uma leve recuperação nas velocidades de onda S, com aumento de até 3%, indicando que a redistribuição das cargas e a redução da umidade contribuíram para uma recuperação gradual da rigidez da estrutura nessa região (Sá et al., 2025).

Os levantamentos de eletrorresistividade aplicados em paralelo identificaram zonas de baixa resistividade elétrica na mesma região (ZBR), indicando a presença de materiais com alta condutividade hidráulica. A Figura 5 indica as zonas mais condutivas mapeadas na ombreira direita da barragem.

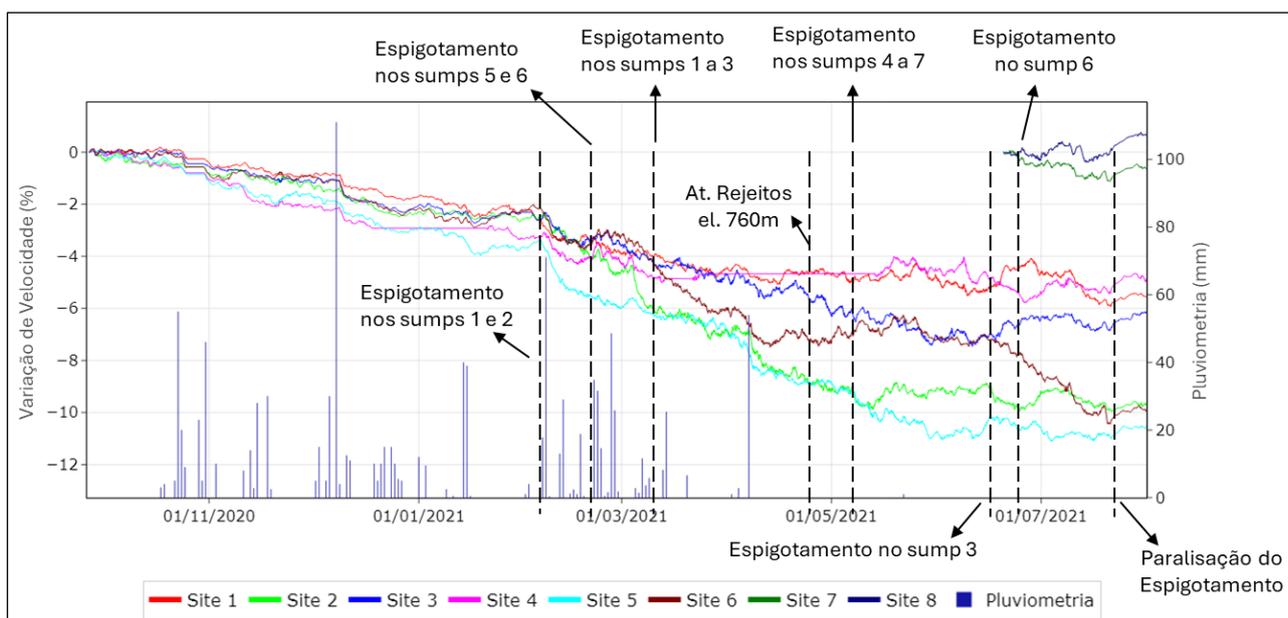


Figura 4. Variação da velocidade da onda S (%) ao longo do período analisado e a precipitação acumulada diária, e a variação de velocidade (%) no período de espigotamento na praia da barragem.

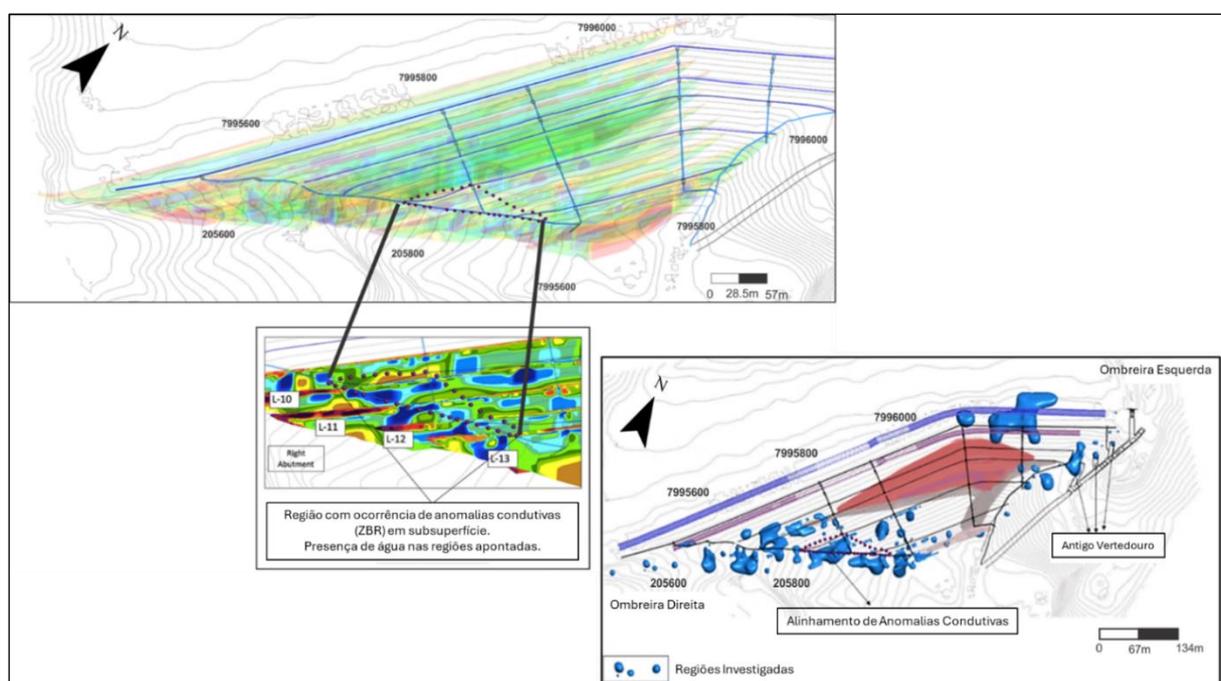


Figura 5. Seções L-10 a L-13 indicando a ombreira direita e as zonas condutivas no subsolo.

Adicionalmente, o método MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) confirmou a presença de velocidades de onda S inferiores a 200 m/s nos mesmos locais, o que reforça a interpretação de que há uma redução da Vs relacionada à maior umidade do meio. A Figura 6 mostra a seção L-01 obtida por meio de MASW, destacando a distribuição das velocidades de Vs ao longo do corpo da barragem. A correlação dos métodos geofísicos da interferometria sísmica, eletrorresistividade e MASW, apontaram para a existência de uma região caracterizada por maior condutividade e com baixa velocidade da Vs, sugerindo ser uma área de atenção em termos de desempenho estrutural (Sá et al., 2024).

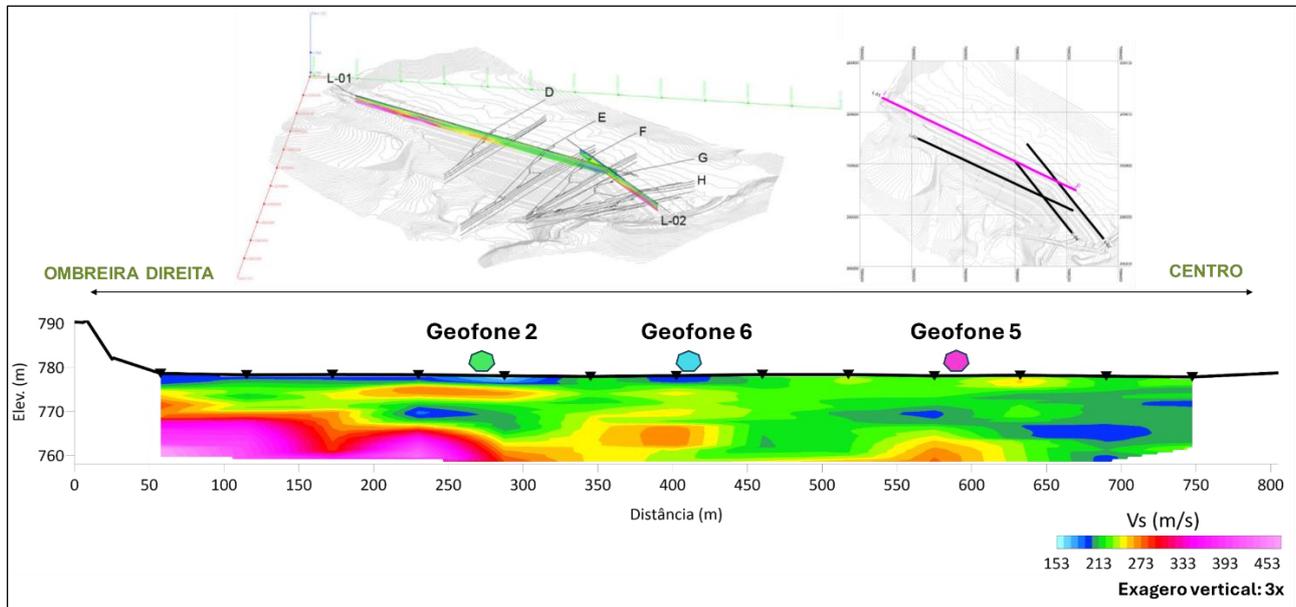


Figura 6. Seção 01 de MASW. Coloração azul, indica zonas de menor Vs, com possível influência de umidade/baixa compactação.

5. CONCLUSÕES

A aplicação da interferometria sísmica de ruído ambiente permitiu monitorar, de forma contínua, possíveis alterações na rigidez do maciço ao longo do tempo. Foi possível identificar reduções na velocidade das ondas de cisalhamento (Vs) nos pontos 2, 3 e 5, localizados na ombreira direita da barragem, com reduções variando entre 10% e 11% no período entre outubro de 2020 e julho de 2021 (Sá et al., 2025). Esses resultados coincidiram com as etapas de reforço da estrutura, nas quais foram realizadas operações de espigotamento nos *sumps* localizados na crista, indicando que o aumento da umidade, especialmente durante a estação chuvosa, afetou diretamente a propagação Vs.

Corroborando com esses dados, os perfis obtidos pelo método MASW também apresentaram valores reduzidos de Vs, inferiores a 200 m/s nas mesmas áreas, caracterizando zonas de menor rigidez. A consistência entre os dois métodos sísmicos reforça a interpretação de que essas regiões são compostas por materiais menos consolidados ou de maior umidade, que comprometem a propagação das ondas elásticas (Sá et al., 2025).

Além disso, os levantamentos de eletrorresistividade identificaram zonas de baixa resistividade (ZBR) na ombreira direita, compatíveis com áreas de alta condutividade hidráulica e maior porosidade. Essas informações foram coerentes com os locais onde foram observadas as maiores perdas da Vs.

Segundo Sá et al., 2025, a partir da realocação do espigotamento para os *sumps* da ombreira esquerda, observou-se estabilização nas leituras de Vs nos pontos mais afetados, sugerindo que o reposicionamento das atividades operacionais contribuiu para o reequilíbrio parcial das propriedades do maciço. Ainda assim, mesmo após a conclusão das obras de reforço, não foi

registrada uma recuperação significativa nos valores de Vs, associado ao comportamento do meio saturado, com os períodos chuvosos e períodos de seca, representados pela variação da freática na estrutura.

Em síntese, a ombreira direita da barragem demonstrou maior sensibilidade às intervenções de espigotamento realizadas durante as obras de reforço. A resposta dos parâmetros sísmicos, associados às condições de umidade e à redistribuição de esforços no maciço, evidencia a importância do monitoramento geofísico contínuo.

Portanto, conclui-se que a integração dos métodos de interferometria sísmica, MASW e eletrorresistividade foi fundamental para identificar zonas associadas a intervenções operacionais e variações hidrogeológicas. Essa abordagem 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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Mosaic Fertilizantes do Brasil pela disponibilidade dos dados e ao Centro de Pesquisa em Geofísica Aplicada (CPGA/UFRJ).

REFERÊNCIAS

BRETON, M. L., BONTEMPS, N., GUILLEMOT, A., BAILLET, L., LAROSE, É. (2021) *Landslide Monitoring Using Seismic Ambient Noise Correlation: Challenges and Applications*. Earth-Science Reviews, Elsevier BV, v. 216, p. 103518.

EIKMEIER, C. N., TAIOLI, F., PRADO, R. L. (2014) *Emprego do método MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) em área urbana: um estudo na cidade de São Paulo*. Monografia (Trabalho de Graduação), Universidade de São Paulo, 41p.

LAGO, A. L., GIACHETI, H. L., ELIS, V. R. (2006) *Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP*. Revista Brasileira de Geofísica, v. 24, n. 3, p. 357-374, abr./ago.

OLIVIER, G., BRENGUIER, F., WIT, T., LYNCH, R. (2017) *Monitoring the Stability of Tailings Dam Walls with Ambient Seismic Noise*. The Leading Edge, v. 36, n. 4, p. 9.

PLANÈS, T., MOONEY, M. A., RITTGERS, J. B. R., PAREKH, M. L., BEHM, M., & SNIEDER, R. (2016) *Time-lapse Monitoring of Internal Erosion in Earthen Dams and Levees Using Ambient Seismic Noise*. Géotechnique, v. 66, n. 4, p. 301–312.

SÁ, G., BRAGA, M. A., ALMEIDA, L. A. P. E., DIAS, L. S. D. O., CUNHA, A. D.A., ROCHA, D. C. G D. (2023) 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/site/cbg2024/anais>. Acesso em: 24 mar. 2025.

SÁ, G., DA MATA, A. K. N., RODRIGUES, E.A., BRAGA, M. A. (2025). Assessment of Geoelectrical and Seismic Methods for Tailing Dams – Catalão – GO. Revista de Geociências do Nordeste, Caicó, v. 11, n.1, (jan-jun) p. 696-707.

TELFORD, W. M.W., GELDART, L.P., SHERIFF, R.E. (1990) *Applied Geophysics*. 2. ed. London: Cambridge University Press, 1990. 792 p.

WAPENAAR, K., DRAGANOV, D., SNIEDER, R., CAMPMAN, X., VERDEL, A. (2010) *Tutorial on seismic interferometry: Part 1 — Basic principles and applications*. Geophysics, v. 75, n. 5, p. 75A195–75A209.