

INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA APLICADA NO PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO E DESCARACTERIZAÇÃO DE UMA BARRAGEM ALTEADA A MONTANTE

Rodrigo Tusi Costa¹; Antonio Flavio Uberti Costa²; Henrile Pinheiro Meireles³; Diego Hilário Teixeira⁴

Resumo – Este trabalho tem o propósito de apresentar os resultados obtidos em um estudo geofísico realizado em uma barragem de rejeitos, alteada a montante, durante o desenvolvimento dos processos de descomissionamento da estrutura (estabilização e descaracterização). Os métodos geofísicos aplicados foram a eletrorresistividade e o MASW e tiveram como objetivo auxiliar no entendimento das questões geotécnicas e hidrogeológicas da barragem. Em uma etapa inicial, os levantamentos geofísicos visaram a caracterização e delimitação dos diferentes tipos de materiais, a detecção do nível freático e a definição de direções de fluxo subterrâneo, além do mapeamento de estruturas e do talvegue original do maciço, visando a locação de poços para rebaixamento do freático. Para que os objetivos propostos na etapa inicial pudessem ser alcançados, os resultados geofísicos foram correlacionados às informações geológicas e hidrogeológicas disponíveis a partir de sondagens mecânicas, INA's e piezômetros existentes na área. Na segunda etapa foi realizado o monitoramento das variações de resistividade e da velocidade da onda S de modo contínuo, auxiliando na identificação das variações do freático, associadas ao processo de rebaixamento, bem como detectando anomalias menores de resistividade e de velocidade da onda S, que pudessem ser indicativas de problemas geotécnicos, associados a mudanças na estabilidade da barragem. Os resultados obtidos permitiram associar as variações de resistividade com as variações do nível freático, bem como com as mudanças climáticas sazonais, sobretudo relacionadas com a ocorrência e a intensidade de chuvas na região.

Abstract – This paper aims to present the results obtained in a geophysical study carried out on a tailings dam, raised upstream, during the development of the structure's decommissioning processes (stabilization and decharacterization). The geophysical methods applied were electrical resistivity and MASW and the goal was to assist in understanding the geotechnical and hydrogeological issues of the dam. In an initial stage, the geophysical surveys aimed to characterize and delimit the different types of materials, detect the water table and define the directions of underground flow, in addition to mapping the structures and the original thalweg of the area, aiming at the location of wells for lowering the water table. To achieve the goals proposed in the initial stage, the geophysical results were correlated with the geological and hydrogeological information available from mechanical surveys, WLI (water level indicators) and piezometers existing in the area. In the second stage, continuous monitoring of resistivity and S-wave velocity variations was carried out, helping to identify variations in the water table associated with the lowering process, as well as detecting minor anomalies in resistivity and S-wave velocity that could be indicative of geotechnical problems associated with changes in the stability of the dam. The results obtained allowed the association of resistivity variations with variations in the water table, as well as with seasonal climate changes, especially those related to the occurrence and intensity of rainfall in the region.

Palavras-Chave – Monitoramento Geofísico, Barragens, Pilhas, Cavas.

¹ Geól., MSc, AFC Geofísica Ltda. (51) 99964-9702, rodrigo@afcgeofisica.com.br

² Geól., Dr, AFC Geofísica Ltda. (51) 99964-9701, antonio@afcgeofisica.com.br

³ Geól., CSN Mineração. (31) 99759-4448, henrile@hotmail.com

⁴ Eng., Serra Verde Pesquisa e Mineração. (31) 98822-3857, diegohteixeiraop@gmail.com.br

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem o propósito de apresentar os resultados de estudos geofísicos aplicados nos Processos de Descomissionamento (Estabilização e Descaracterização) de uma Barragem Alteada a Montante, localizada no Estado de Minas Gerais.

Em um primeiro momento, na etapa anterior ao processo de estabilização (Etapa 1), foram aplicados os métodos da Eletrorresistividade, através da técnica do Imageamento Elétrico e do MASW, com linhas programadas de forma abrangente em toda a área da estrutura. Teve como principais objetivos a caracterização e delimitação dos diferentes tipos de materiais, detecção do nível freático, direções de fluxo subterrâneo, mapeamento de estruturas e do talvegue original para locação de poços para rebaixamento do freático, bem como a caracterização da rigidez do maciço através da análise da velocidade da onda S. Os resultados geofísicos foram correlacionados às informações geológicas e hidrogeológicas disponíveis na área a partir de inúmeras sondagens, INA's e piezômetros existentes.

Na Etapa 2, realizada durante o processo de estabilização e rebaixamento do freático e na posterior descaracterização que vem sendo realizada, os métodos geofísicos foram aplicados através do uso do Sistema Delfos, desenvolvido pela AFC Geofísica com apoio da Finep, que permite o monitoramento em tempo real utilizando os métodos da Eletrorresistividade e MASW na barragem. Os objetivos foram monitorar o rebaixamento do freático a partir das medições de resistividade elétrica, essencial para a mudança de nível de emergência da estrutura e conseqüentemente para a liberação do processo de descomissionamento, bem como realizar um monitoramento preditivo com mapeamento contínuo de variações de resistividade e de velocidade da onda S, que possam detectar possíveis problemas geotécnicos da estrutura.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS

2.1. Eletrorresistividade

O método Eletrorresistividade mede a variação da resistividade elétrica das rochas e solos em subsuperfície, que depende, basicamente, da porosidade, do grau de saturação, da resistividade da água subterrânea e da fração argilosa no meio. Por essa razão, o método se caracteriza por ser uma ferramenta geofísica adequada e eficiente na detecção de zonas saturadas em subsuperfície, possivelmente associadas ao nível freático, bem como às infiltrações no maciço de uma barragem.

Quando os teores de argila no meio são pouco expressivos, a equação de Archie (1942) – Equação 1, define a resistividade da rocha, que, neste caso, basicamente, depende da sua porosidade e do seu grau de saturação, bem como da resistividade da água preenchendo os vazios. Assim, como regra geral, quanto maior for a porosidade da rocha e o grau de saturação, bem como, quanto menor for a resistividade da água subterrânea, menor deverá ser a resistividade da rocha.

Por outro lado, quando minerais argilosos estão presentes no meio rochoso de modo significativo, a equação de Simandoux (1963) – Equação 2, que considera a fração argilosa, deve ser adotada. Neste caso, a resistividade total de uma rocha (argilosa) não é apenas uma função da sua porosidade, do seu grau de saturação e da resistividade da água nos vazios, mas também da condutividade intrínseca das argilas, sendo definida por:

$$r_r = a \cdot f^m \cdot S_w^{-n} \cdot r_w \quad (1)$$

$$1/\rho_r = V_{arg} / \rho_{arg} \cdot S_w + f^m / a \cdot \rho_w \cdot (S_w)^2 \quad (2)$$

r_r (resistividade da rocha); r_w (resistividade da água subterrânea); ρ_{arg} (resistividade da argila); f (porosidade); S_w (grau de saturação); V_{arg} (Volume da fração de argila); n (aproximadamente 2); 'a' e 'm' (constantes, com 'a' variando entre 0.5 e 2.5 e 'm' entre 1.3 e 2.5)

De um modo geral, em relação a barragens, pode-se dizer que solos secos apresentam alta resistividade e tem grande contraste em relação a solos saturados, com resistividades menores. No entanto, uma situação específica, associada à fração argilosa do meio, foi analisada por Dahlin (2008). De acordo com o autor, em camadas saturadas podem ocorrer variações pequenas de resistividade relacionadas com processos de erosão interna e, quando a erosão ocorre, as partículas finas do solo são lavadas e este processo afeta a resistividade de duas maneiras distintas e inversas: no primeiro caso, a erosão e a lavagem dos finos aumenta a porosidade, levando a uma diminuição da resistividade, devido ao maior volume de água; e na segunda possibilidade, a redução no teor de finos poderia ser predominante, provocando um efeito inverso, de aumento de resistividade. Ou seja, embora seja difícil a previsão sobre qual efeito poderia ser mais relevante e significativo no processo de erosão no interior de zonas saturadas, o monitoramento da variação da resistividade, de qualquer forma, seria de extrema importância no longo prazo, na medida em que tanto a variação negativa quanto a positiva, poderiam indicar a existência de um processo erosivo no interior do maciço da barragem.

2.2. MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

O método MASW – Multichannel Analysis of Surface Waves foi desenvolvido por Park et al. (1999). É uma técnica da metodologia sísmica que permite determinar a variação da velocidade de propagação das ondas S em função da profundidade, com rapidez e qualidade, a partir do registro de ondas de superfície (ground-roll), com base na relação que existe entre esses dois tipos de onda.

As ondas de superfície são dispersivas, ou seja: a velocidade de propagação varia em função da frequência. Por outro lado, o alcance em profundidade é diretamente proporcional ao comprimento de onda das ondas de superfície. O método MASW consiste no registro das ondas de superfície e na construção de uma imagem de dispersão destas ondas em função da frequência.

A partir da imagem de dispersão, onde o padrão associado com as ondas de superfície fica definido, obtém-se o modelo de variação da velocidade de propagação das ondas S em função da profundidade (1D). Vários modelos 1D, posicionados ao longo de uma linha, permitem a obtenção de uma seção 2D interpolada da variação da velocidade das ondas S.

Existem dois procedimentos para aquisição de dados: ativo e passivo, sendo que as duas informações podem ser combinadas para o processamento conjunto dos dados. No MASW Ativo a fonte de energia utilizada é uma marreta e a profundidade de investigação normalmente é da ordem de 30 metros. No MASW Passivo a fonte de energia utilizada é o ruído do ambiente, artificial e natural. Um exemplo de ruído artificial é o provocado pelo tráfego de veículos em vias urbanas, e de ruído natural é o provocado por relâmpagos, ondas, marés, etc. No MASW Passivo o alcance em profundidade pode chegar a algumas centenas de metros.

A grande vantagem do método MASW para problemas de engenharia é justamente o fato de que o método utiliza como fonte de energia o que seria considerado ruído para os métodos sísmicos convencionais, tornando-se o método ideal para aplicação em ambientes urbanos e/ou canteiros de obras. Além disso, o método MASW é operacionalmente mais prático de aplicar e, conseqüentemente, de menor custo em relação a outros métodos para determinação da velocidade de propagação das ondas S, tais como refração convencional de superfície e ensaios Crosshole e Downhole.

A determinação da velocidade de propagação da onda S é importante tanto no diagnóstico como no monitoramento da estabilidade de estruturas de engenharia do tipo barragens e pilhas de rejeitos, bem como também de taludes em cavas de minas.

A velocidade da onda S tem relação direta com o módulo de cisalhamento (G), que é definido por $G = \rho \cdot V_s^2$, com ρ sendo a densidade e V_s a velocidade da onda S no meio. O módulo de cisalhamento caracteriza os materiais pela sua rigidez e pela sua resistência à deformação transversal a esforços.

Do mesmo modo, os valores de velocidade da onda S (V_s) dos solos, rochas e sedimentos são importantes porque permitem caracterizar os materiais em termos do grau de compactação,

bem como também do seu potencial de liquefação. Na Tabela 1, extraída de Park (2023), os valores inferiores a 200 m/s estão associados à presença de material solto, extremamente mole a mole.

Por outro lado, de acordo com Andrus et al. (2004) é possível avaliar o potencial de liquefação dos sedimentos através da medição da velocidade da onda S. Segundo Andrus et al. (2004), o limite superior V_{s1}^* para velocidade da onda S, com potencial real de liquefação do meio, varia entre 200 m/s e 215 m/s e pode ser estimado pela relação $V_{s1}^* = 215 - 0.5(FC-5)$, para $5\% < FC < 35\%$, sendo FC o conteúdo médio de finos em percentual.

Além do módulo de cisalhamento e dos parâmetros geotécnicos definidos a partir da velocidade da onda S, anteriormente comentados, a determinação do perfil de variação da velocidade da onda S em profundidade possibilita o cálculo do Vs30 do local, que consiste na velocidade média da onda S até 30 metros de profundidade e permite classificar o terreno de acordo com os critérios estabelecidos pelo IBC – International Building Code (2012). O IBC trata das providências técnicas e dos requisitos mínimos necessários para garantir a segurança de projetos de engenharia, sendo que um dos parâmetros utilizados é o valor do Vs30, com o qual é possível classificar os terrenos em seis classes, denominadas A, B, C, D, E e F (conforme Tabela 2).

Finalmente, além da definição do padrão de distribuição espacial de valores de velocidade da onda S em uma estrutura, e sua correlação com a geologia, o monitoramento de variações pequenas ao longo do tempo é fundamental para o acompanhamento de alterações do meio que possam estar modificando a estabilidade das estruturas. Variações pequenas de velocidade da onda S podem estar associadas a mudanças de pressão em trincas (Nur, 1971), de saturação de fluídos (O’Connell & Bodiensky, 1974) e de pressão dos fluídos nos poros (Brenquier et al, 2014) em subsuperfície. De Wit & Olivier (2018) relacionaram uma redução de 0.3% na velocidade da onda S em uma barragem ao aumento do grau de saturação devido às chuvas, provocando aumento na pressão dos fluídos nos poros, com conseqüente abertura de microtrincas. Da mesma forma, De Wit & Olivier (2018) associaram uma maior redução de velocidade da onda S, da ordem de 2%, ao período de maior intensidade de chuvas, com aumento do nível d’água de 30 cm, observado nos piezômetros. O acompanhamento destas variações de velocidade e as suas localizações espacial e temporal, feito com precisão, é fundamental para o entendimento da estabilidade das estruturas monitoradas.

Tabela 1. Velocidades da Onda S para Diferentes Materiais (extraída de Park, 2023).

- $V_s \leq 100$ m/s – “extremely soft” soil
- 100 m/s $\leq V_s \leq 200$ m/s – “soft” soil
- 200 m/s $\leq V_s \leq 300$ m/s – “stiff” soil
- 300 m/s $\leq V_s \leq 500$ m/s – “weathered” zone
- 500 m/s $\leq V_s$ – “rock”
- 1000 m/s $\leq V_s$ – “competent” rock

Tabela 2. Classificação dos terrenos em função de Vs30 (extraída do IBC - International Building Code, 2012).

Site Class	S-Velocity (Vs) (ft/sec)	S-Velocity (Vs) (m/sec)
A (Hard Rock)	> 5,000	> 1500
B (Rock)	2,500 – 5000	760 – 1500
C (Very Dense Soil and Soft Rock)	1,200 – 2,500	360 – 760
D (Stiff Soil)	600 – 1,200	180 – 360
E (Soft Clay Soil)	< 600	< 180
F (Soils requiring additional response)	< 600, and meeting some additional conditions.	< 180, and meeting some additional conditions.

3. ESPECIFICAÇÕES DO LEVANTAMENTO

Nos Levantamentos realizados na Etapa 1 a técnica do Imageamento Elétrico, foi aplicada usando um resistímetro modelo SSting R8IP, fabricado pela Advanced Geociences Inc, com espaçamento de eletrodos de 10 metros. Já a coleta de dados das linhas de MASW foram feitas com o equipamento Geode, fabricado pela Geometrics, em um sistema com 24 geofones espaçados a cada 2,5 metros, sendo que o avanço dos lances de 24 geofones foi de 10 metros. Já os levantamentos realizados na Etapa 2, referentes ao monitoramento geofísico, os dados estão sendo coletados através do Sistema Delfos (referência desse congresso 2025), utilizando espaçamento de eletrodos de 5 metros e de geofones de 2,5 metros.

A geração de modelos geofísicos está sendo feita através dos softwares RES2DINV, para os dados de Eletrorresistividade, e ParkSeis, para o MASW. A apresentação dos resultados, através de seções, mapas e voxels georreferenciados, tem sido realizada usando o software Oasis Montaj da Seequent.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Etapa 1

Na Figura 1 está apresentado o voxel 3D de resistividade com a localização das sondagens existentes na barragem. É possível ver em detalhe duas zonas de baixa resistividade onde a profundidade do nível freático ocorre próxima da superfície, sendo uma dessas zonas alongada paralelamente ao longo da estrutura e situada no pé da barragem, e a outra zona situada em local onde foram realizadas escavações no reservatório da estrutura (canais drenantes) que conduzem o fluxo para um sump a montante da estrutura. As zonas aflorantes de alta resistividade estão relacionadas com os locais onde o nível d'água ocorre mais profundo nas áreas do aterro e reservatório. As sondagens mostram a presença dos sedimentos do aterro da barragem (silte e areia) nas zonas de baixa resistividade e uma sondagem à leste mostrando a presença do xisto (rocha encaixante), coincidindo com zonas de alta resistividade. Esta sondagem serviu como referência para a interpretação do topo rochoso (em tracejado preto) nas zonas mais profundas ao longo da barragem.

A Figura 2 mostra um exemplo de uma seção 2D de resistividade (Figura 2A) localizada próxima da crista e uma correlação com a geologia e hidrogeologia local (Figura 2B) que foi gerada a partir das sondagens, piezômetros e INAs localizados na barragem. O padrão de anomalias mostra resistividades altas aflorando e se estendendo em profundidade até em torno de 10 a 15 metros, que está relacionada com o aterro não saturado, e abaixo desta camada, a resistividade diminui para valores menores que 600 Ohm.m, devido a saturação em maiores profundidades (a linha azul é o nível d'água projetado através de uma superfície obtida com as informações dos INA's e piezômetros). É possível observar também que a anomalia de baixa resistividade que ocorre mais profunda na seção, está relacionada com o contato do aterro com o solo residual alterado predominantemente argiloso. As anomalias profundas com resistividades maiores que 1500 ohm.m, foram interpretadas como rocha sã ou pouco fraturada.

Na Figura 3A está apresentado o voxel 3D de velocidade da onda S (V_s), e na Figura 3B, a delimitação das zonas mais rasas e superficiais com V_s menores que 180 m/s. Em profundidades maiores, a velocidade (V_s) aumenta com valores geralmente maiores que 250 m/s (Figura 4), sugerindo que o aterro esteja mais compactado nessas zonas.

A partir dos voxels de resistividade e da V_s foram gerados mapas com slices de diferentes profundidades e cotas, nos quais foram marcadas as principais estruturas relacionadas com os baixos de resistividade e V_s . A figura 5 apresenta exemplos desses mapas. A Figura 5A mostra a variação da resistividade na cota 900 m, onde os baixos de resistividade (tracejados brancos) são indicativos da presença dos talwegues na posição correta atual. Observa-se uma semelhança entre os tracejados brancos e os eixos dos talwegues do mapa primitivo (tracejado azul), embora estes apresentem-se um pouco deslocados. Da mesma forma, observa-se uma boa correlação

entre os baixos de resistividade e os locais onde, posteriormente, também foram detectadas anomalias no monitoramento 4D (Etapa 2 que será discutida na sequência). A Figura 5B apresenta o mapa de Vs30, no qual se observa que as anomalias dos baixos de Vs30 se correlacionam bem com os eixos dos baixos de resistividade (talvegues) e com as anomalias do monitoramento 4D (linhas pretas na imagem). Essas anomalias de Vs30 indicam locais de ocorrência de material menos resistente. Com base no observado, fica evidenciada uma boa correlação com os eixos dos talvegues e as anomalias de baixos de resistividade e de Vs30, que também tiveram boa correlação com as anomalias mapeadas posteriormente no monitoramento 4D. A partir dos resultados da geofísica, essas zonas anômalas foram analisadas e utilizadas como guias prospectivos na locação dos poços para rebaixamento do freático, com bons resultados em termos de vazão desses poços.

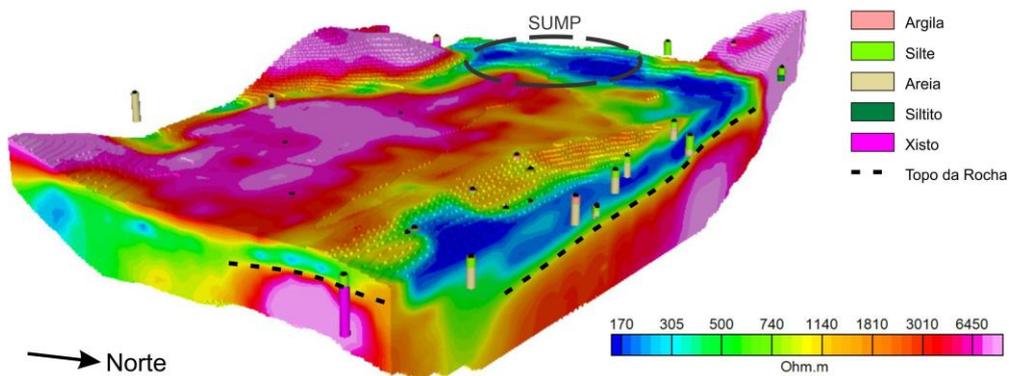


Figura 1. Voxel 3D de Resistividade com Geologia das Sondagens Localizadas na Barragem.

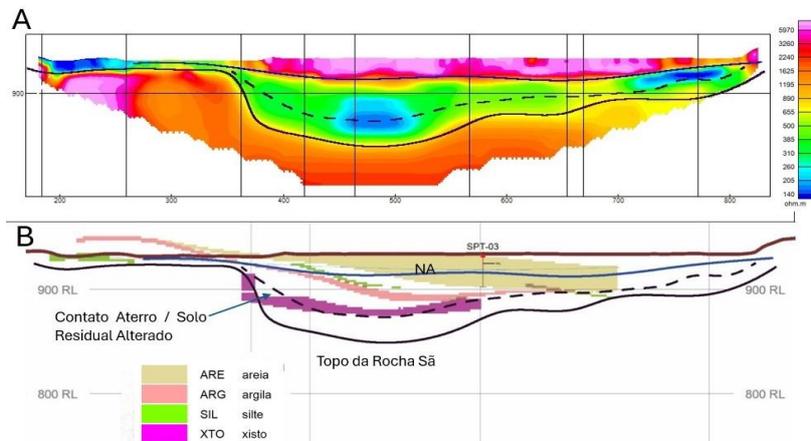


Figura 2. (A) Seção 2D de resistividade. (B) Seção geológica com nível d'água.

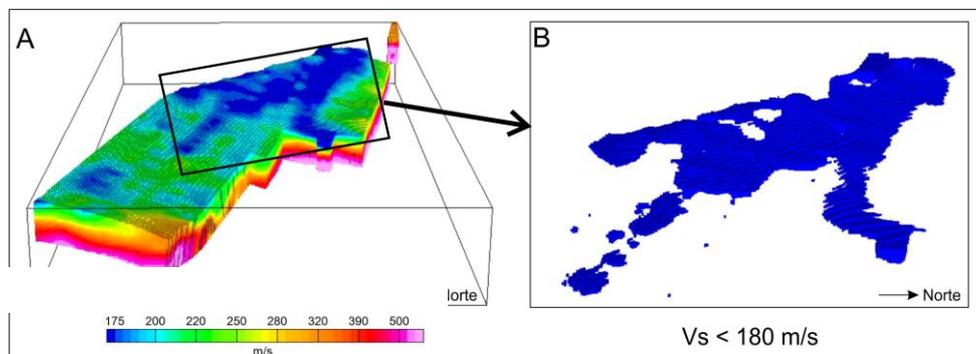


Figura 3. (A) Voxel dos modelos de Vs e (B) delimitação de anomalias rasas com Vs menor que 180 m/s.

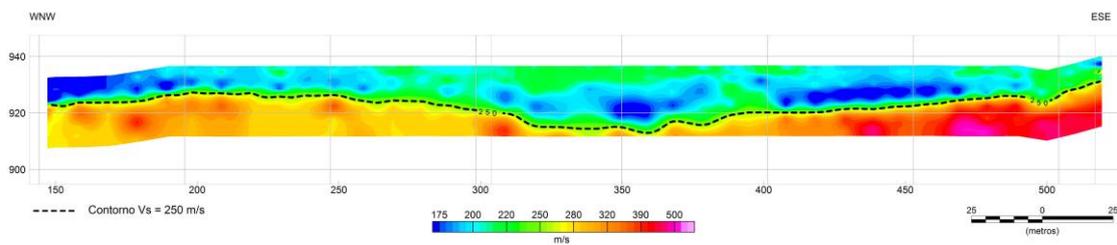


Figura 4. Seção de MASW localizada na crista da barragem mostrando contorno de 250 m/s (tracejado preto).

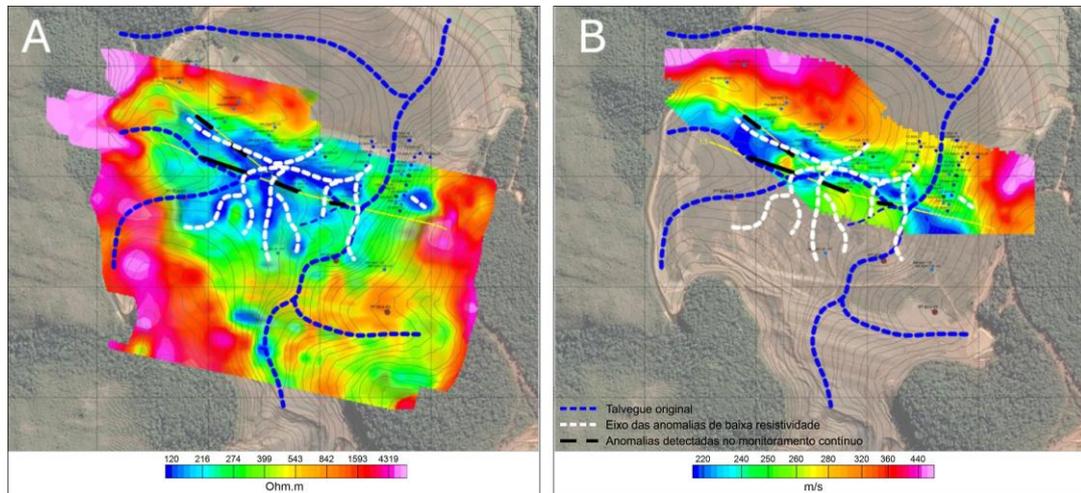


Figura 5. Mapas de Resistividade e Vs30 Utilizados na Análise Estrutural e Locação de Poços.

4.2. Etapa 2 – Monitoramento da Resistividade

O principal objetivo do monitoramento da resistividade foi medir a variação do nível d'água (NA) durante o processo de rebaixamento realizado para estabilização da barragem e posterior descaracterização. Para isso, foi feito um processo de calibração com o intuito de estimar a resistividade associada ao topo do nível d'água, relacionando-se os dados dos modelos 2D das linhas localizadas na crista e os piezômetros e INA's localizados ao longo dessas linhas. A partir da calibração, o valor de referência de resistividade de 600 ohm.m foi utilizado no controle da variação do NA (Figura 6).

Durante o monitoramento, ficou evidenciado que nos períodos sem chuvas, após o início do bombeamento dos poços, ocorreu de maneira geral um rebaixamento mais acentuado do freático. Por outro lado, nos períodos chuvosos (meses de novembro a fevereiro), houve normalmente uma pequena elevação do freático.

Na Figura 7 estão apresentadas seções dos modelos de resistividade verdadeira de uma linha de monitoramento situada na crista e ombreira esquerda, dos dias 16/07/2022 (topo a esquerda na figura) e 20/05/2024 (topo a direita na figura). Já a seção de baixo a esquerda mostra a variação em percentual que ocorreu na resistividade verdadeira entre as datas citadas acima. A anomalia grande e positiva com variação maior que 100%, situada entre as cotas 925 e 910 metros tem relação com o rebaixamento do freático efetivo que ocorreu nesse período.

Por fim, os perfis mostrados na parte de baixo a direita da Figura 7, mostram a variação da resistividade: o perfil em vermelho correspondente a resistividade média do modelo 2D, em verde refere-se a diferença entre as médias da primeira e da última medição e o perfil em azul mostra a diferença entre as duas últimas medições (variação semanal ocorrida).

Pode-se observar que a partir de outubro de 2023 as resistividades médias começaram a diminuir devido as chuvas. Além disso, se compararmos a variação entre março de 2023 e março de 2024, houve um aumento médio de resistividade em torno de 12%, que indica que o rebaixamento do freático foi efetivo no período. No entanto, chama a atenção que houve

diminuição de resistividade na parte rasa do aterro da barragem e em algumas zonas profundas. As faixas em coloração roxa escura na seção da diferença percentual, indicam as zonas em que houve diminuição de resistividade no período.

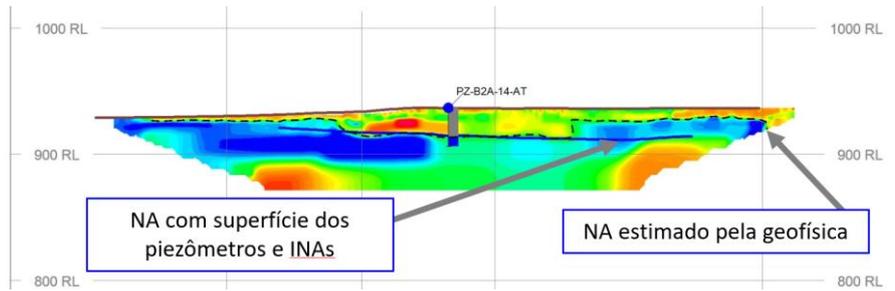


Figura 6. Calibração e Correlação da Profundidade do nível freático com a Resistividade de 600 ohm.m.

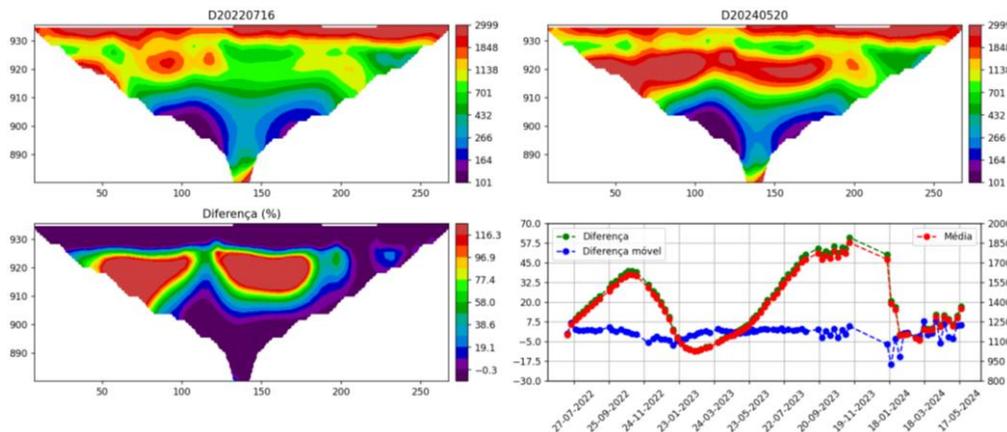


Figura 7. Seções de resistividade do monitoramento - (entre dias 16/07/2022 e 20/05/2024) e perfis de variação de resistividade.

4.3. Etapa 2 – Monitoramento da Velocidade da Onda S

O monitoramento da velocidade da onda S vem sendo feito de duas formas distintas:

1 - Análise das variações de velocidade da onda S através da geração periódica de modelos, normalmente de oito camadas, correlacionados com a geologia, onde são construídos gráficos de $V_s \times Z$ (velocidade da onda S versus profundidade). O monitoramento procura identificar tendências de variação ao longo do tempo, para cada camada, com previsão de aumento do risco de instabilidade na estrutura, em caso de aproximação da V_s do valor de referência, considerado 200 m/s (limite superior para material solto (Park, 2023) e material com potencial de liquefação (Andrus et al., 2004). Na Figura 8 é apresentado um exemplo de variação e tendências de variação da velocidade da onda S no eixo da barragem. De um modo geral, as velocidades da onda S no interior do aterro (maciço da barragem) vem se mantendo estáveis, na faixa entre 250 m/s e 310 m/s. Valores abaixo de 250 m/s somente ocorreram em dois casos, neste período: na camada 3, em novembro, e na camada 6, em dezembro. Assim, no período monitorado, as velocidades mostraram tendência de estabilidade, conforme se pode verificar na Figura 8, tanto para a camada 6, como também na avaliação de tendência de variação feita usando os valores calculados de V_{s30} .

2 - No segundo caso, o monitoramento vem sendo feito usando uma técnica que faz a análise da variação da velocidade de fase por frequência da onda Rayleigh, a partir de registros sísmicos obtidos através do Sistema Delfos. A técnica empregada permite identificar e posicionar, no tempo e no espaço, com alta resolução e precisão, variações pequenas da velocidade de fase, que, normalmente, são indicativas de variações de pressão, grau de saturação e pressão de fluidos nos poros, conforme Nur (1971), O'Connell & Bodiensky (1974), Brenguier et al. (2014) e De Wit & Olivier (2018). Na Figura 9 é apresentado um exemplo de variação de -2.3% na

velocidade de fase, identificada entre os dias 10/02/2025 e 19/02/2025, que ocorreu em profundidade estimada em torno de 13 metros. Essa variação poderia estar relacionada à precipitação pluviométrica mais acentuada, ocorrida no período anterior.

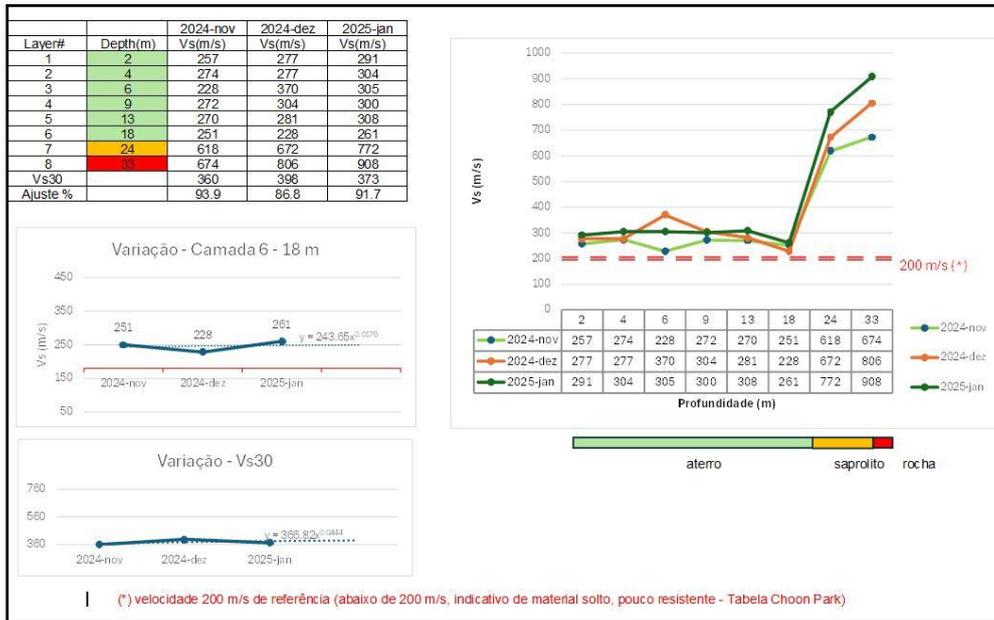


Figura 8. Exemplo de variação de modelos de Vs e tendências de variações no período entre novembro/24 e janeiro/24

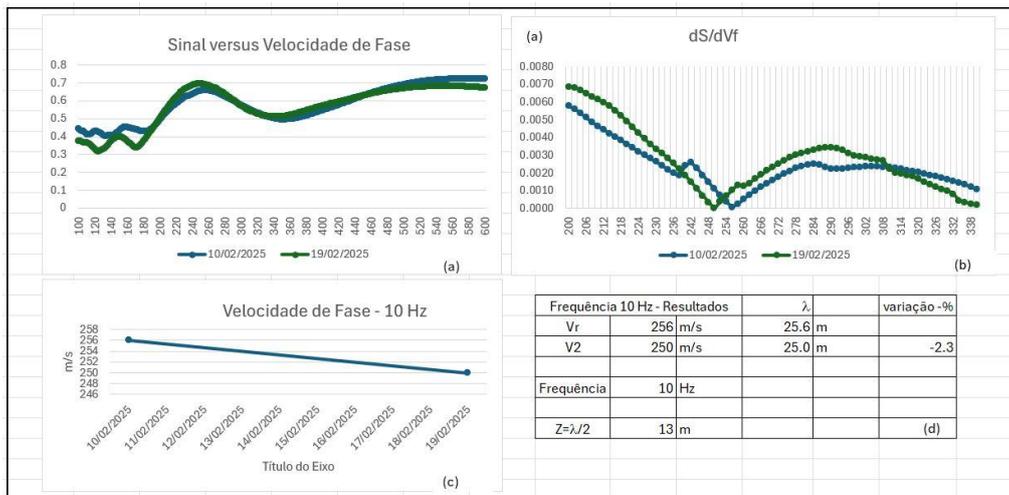


Figura 9. Exemplo de sinal da velocidade de fase da onda Rayleigh definida para os dias 10/02/2025 e 19/02/2025, com variação de -2.3% no período. (a) sinal em função da velocidade de fase para frequência selecionada de 10 Hz, nas duas datas, os dois picos indicam as velocidades de fase; (b) derivada dos sinais em função da velocidade de fase, com valores zero definindo as velocidades; (c) gráfico da variação de Velocidade de fase no período e (d) tabela com resumo dos resultados definidos na análise.

5. CONCLUSÕES

Os levantamentos geofísicos realizados na Etapa 1 foram efetivos na caracterização do maciço, auxiliando no mapeamento do contato do aterro com o terreno natural e a rocha sã, na detecção do freático, bem como na delimitação de anomalias com baixos valores de resistividade e Vs, relacionadas a zonas com maior percolação de água no maciço e na rocha encaixante, que serviram de guia para locação dos poços de rebaixamento.

Já o monitoramento geofísico que vem sendo realizado, tem se mostrado muito importante na medição do rebaixamento do nível freático que segue sendo feito no processo de descaracterização da barragem, bem como no controle preditivo de anomalias geofísicas que possam vir a ser um risco geotécnico para a estrutura. Os resultados mostraram que as variações de resistividade e Vs tem relação direta com a percolação e presença de água e pode inclusive estar relacionada com diminuição de rigidez no aterro da barragem.

REFERÊNCIAS

ANDRUS, R.D., STOKOE II, K.H. & JUANG, C.H. (2004). Guide for Shear-Wave- Based Liquefaction Potential Evaluation. *Earthquake Spectra*, Volume 20, No. 2, pages 285-308, May 2004. Earthquake Engineering Research Institute.

ARCHIE, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 146, 54-62.

BERGSTRÖM, J. (1998). Geophysical methods for investigating and monitoring the integrity of sealing layers on mining waste deposits. Licentiate Thesis, ISSN 1402-1757, ISRN LTU-LIC – 98/24 – SE, Luleå University of Technology, p 77

BRENGUIER, F., CAMPILLO, M., TAKEDA, T., AOKI, Y., SHAPIRO, N.M., BRIAND, X., EMOTO, K. & MIYAKE, H. (2014). Mapping pressurized volcanic fluids from induced crustal seismic velocity drops, *Science*, vol.345, no. 6192, pp. 80-82.

DAHLIN, T. (2008). Investigation of geophysical methods for assessing seepage and internal erosion in embankment dams: A guide to resistivity investigation and monitoring of embankment dams. Report for CEA TECHNOLOGIES Inc. (CEATI).

DE WIT, T. & OLIVIER, G. (2018). Imaging and monitoring tailings dam walls with ambient seismic noise. Australian Centre for Geomechanics, Perth, ISBN 978-0-9924810-8-7.

IBC (2012). International Building Code

NUR, A. (1971). Effects of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks. *Journal of Geophysical Research*, vol.76, no.8, pp.2022-2034.

O'CONNELL, R.J. & BODIANSKY, B. (1974). Seismic velocities in dry and saturated cracked solids, *Journal of Geophysical Research*, vol.79, pp.5412-5426.

PARK, C.B., MILLER R.D. & XIA, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics* 64, pp. 800-808.

PARK, C.B., MILLER R.D., XIA, J. & IVANOV, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) – active and passive methods. *The Leading Edge*. January 2007, pp 60-64.

PARK, C. B. (2023). MASW Short Course @ EAGE-NSGE 2023, Taipei, Taiwan.

SIMANDOUX, P.; (1963). Mesures dielectrique em milloux poreux, application a mesure des saturations em eaux, etude du comportement des massifs argileux: Ver. De l'Institut Français du Petrole, Supplementary issue.