

**LEVANTAMENTO GEOFÍSICO DE ANOMALIAS EM BARRAGEM DE
SEDIMENTOS: APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CAMINHAMENTO
ELÉTRICO E POTENCIAL ESPONTÂNEO**

Rafaela de Carvalho de Saar¹; Monica Pessoa Neves²; Maximiliano Lopes Simão³; Vinicius Paiva Guedes⁴; Giovanni Jordi Bruschi⁵

Resumo – Este estudo apresenta uma análise integrada dos métodos geofísicos elétricos para identificação e entendimento de uma anomalia quanto ao nível de água detectado por um instrumento instalado no maciço de uma barragem de terra. A partir do método de caminhamento elétrico, foi possível identificar zonas com baixa resistividade elétrica com sentido preferencial de fluxo, especialmente concentradas na porção central do maciço, compatíveis com as elevadas medições do nível de água. O levantamento de potencial espontâneo, por sua vez, revelou anomalias negativas e positivas associadas, respectivamente, a zonas onde ocorre infiltração de água, indicando predominantemente fluxos descendentes a partir da superfície e ascendentes em direção à jusante, também influenciados pelo reservatório da estrutura. A integração dos dois métodos forneceu uma interpretação mais robusta das condições de percolação interna, permitindo inferir a dinâmica de fluxo e rápida infiltração no maciço da estrutura, especialmente em dias chuvosos. Os resultados evidenciam a aplicabilidade de métodos geofísicos não invasivos como ferramentas complementares na avaliação da segurança e no diagnóstico de desempenho hidráulico de estruturas de barragem.

Abstract – This study presents an integrated analysis of geophysical methods—electrical resistivity and self-potential—for the hydrogeological characterization of an earthfill dam. The electrical resistivity surveys identified low-resistivity zones, particularly concentrated in the central portion of the embankment, corresponding to areas with high moisture content and potential preferential seepage pathways. The self-potential data revealed negative and positive anomalies, associated respectively with infiltration and exfiltration zones, indicating predominantly downward flow from the surface and upward flow towards the downstream face. The integration of both methods provided a more comprehensive understanding of internal seepage conditions, allowing for inferences about groundwater flow dynamics and potential critical areas within the dam structure. The results emphasize the effectiveness of non-invasive geophysical methods as complementary tools for assessing dam safety and diagnosing hydraulic performance in embankment dams.

Palavras-Chave – Barragem de sedimentos; instrumentação; geofísica.

¹ Eng. VALE S.A., Itabira – MG, (24) 99825-0801, rafaela.saar@vale.com

² Geól., Ph.D., Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, (31) 99977-1638, monica.neves@ufop.edu.br

³ Geofísico, Vale S.A., Nova Lima – MG, (11) 985206874, max.simao@vale.com

⁴ Eng., Ms.C., STATUM Geotecnia, Belo Horizonte - MG, (21) 98751-1333, vinicius.guedes@statum.eng.br

⁵ Eng., Ph.D., STATUM Geotecnia, Belo Horizonte - MG, (54) 98132-5184, giovanni.bruschi@statum.eng.br

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens de contenção, incluindo aquelas destinadas ao armazenamento de sedimentos, exige o uso de métodos de investigação capazes de identificar variações internas no maciço, zonas de percolação e outros potenciais mecanismos de instabilidade. Em estruturas existentes, sobretudo com acesso limitado ou com histórico de operação prolongada, os métodos geofísicos têm se mostrado ferramentas valiosas por sua capacidade de obter dados em subsuperfície de forma não invasiva, rápida e com boa relação custo-benefício (Jongmans & Garambois, 2007; Chambers et al., 2014).

Dentre os métodos geofísicos comumente empregados em estudos aplicados à engenharia de barragens, destacam-se os métodos de caminhamento elétrico e o potencial espontâneo (SP). O caminhamento elétrico permite a identificação de contrastes na resistividade elétrica do subsolo, os quais podem estar associados a variações na saturação, presença de fraturas, zonas de infiltração ou materiais de diferentes naturezas (Binley & Kemna, 2005; Loke et al., 2013). Já o método SP tem sensibilidade a fluxos naturais de água, sendo utilizado para mapear zonas de percolação e gradientes hidráulicos (Revil et al., 2005).

A integração de dados geofísicos com informações topográficas e geotécnicas permite uma caracterização mais robusta do estado atual da estrutura, servindo como base para diagnósticos e decisões sobre medidas corretivas ou de monitoramento (Mota et al., 2021). A aplicação desses métodos em barragens de sedimentos é especialmente relevante, considerando as características heterogêneas dos materiais utilizados em sua construção, bem como o potencial de ocorrência de processos como erosão interna ou colapsos localizados.

Neste trabalho, apresentam-se os resultados de duas campanhas de geofísica realizadas em uma barragem de sedimentos localizada no estado de Minas Gerais. Foram aplicados os métodos de caminhamento elétrico e SP, com o objetivo de identificar anomalias internas e apoiar a avaliação das condições geotécnicas da estrutura. A seguir, são descritos os procedimentos metodológicos adotados, os parâmetros utilizados nas aquisições, os critérios de controle de qualidade e a análise interpretativa dos resultados obtidos.

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A área de estudo corresponde a uma barragem de terra construída com o objetivo de conter sedimentos provindos de atividades minerárias no estado de Minas Gerais. A estrutura foi construída no ano de 2015 em etapa única, assentada em uma fundação composta por saprolito e rocha alterada de granito. Apresenta altura máxima de 21,0m, comprimento de crista de 118,0m e área de reservatório de 97.300,0m².

Entre os anos de 2019 a 2021 a estrutura passou por extensa campanha de investigação geológico-geotécnica para os estudos de As Is. Nessa ocasião foram realizadas em torno de 25 sondagens mistas, 10 ensaios SPT, além de sondagens a trado e coletas de amostras deformadas e indeformadas. Além desses estudos, foram executadas pela empresa AFC duas campanhas de geofísica, uma no período seco e outra no chuvoso.

Os levantamentos geofísicos foram realizados utilizando métodos de caminhamento elétrico e SP, com o objetivo de investigar uma anomalia a partir de um aumento de água em um instrumento situado na berma intermediária da estrutura.

Esse fato ocorria em dias chuvosos onde um indicador de nível de água (INA), situado na berma intermediária com profundidade de 7,5m e posicionado logo acima do tapete drenante, que no período sem chuva se apresentava seco, aumentava sua lâmina de água em torno de 3,0m. Esse fenômeno era observado de um dia para outro, já que a sua leitura era realizada diariamente. Da mesma forma que esse INA “carregava” rapidamente, o fenômeno inverso também ocorria em dias de estiagem, ou seja, ele voltava para o seu nível normal, seco.

Essa anomalia somada ao fato dos instrumentos próximos a ela (piezômetros e INAS manuais e automatizados) não apresentarem esse tipo de fenômeno, fez com que a equipe responsável pelos estudos de As Is, bem como os geotécnicos da Vale quisessem avaliar com

mais detalhe essa ocorrência. Essa análise também incluiu o tipo de material de construção utilizado e sua edificação.

Após pesquisas sobre sua construção, descobriu-se que a área de empréstimo é formada por solo saprolítico de granito com porções heterogêneas, ora argilosa, ora siltosa, com conteúdos variáveis de areia fina. A utilização desse material heterogêneo resultou em um caminho preferencial de água em seu maciço, detectado em dias de chuvas intensas a partir de um INA situado em sua berma intermediária. Esse fluxo, em parte influenciado por materiais de textura heterogênea presentes na porção central da barragem, pode também ter influência de um fluxo provindo de seu reservatório.

Após a finalização e entrega do As Is, ou seja, elucidadas as dúvidas quanto as anomalias presentes, a estrutura foi submetida a uma obra de reforço que incluiu melhorias estruturais além da adequação de crista com a instalação de um muro New Jersey com capacidade para uma precipitação máxima provável (PMP).

3. METODOLOGIA

3.1. Levantamento geofísico

Os levantamentos geofísicos foram realizados utilizando métodos de caminhamento elétrico e potencial espontâneo (SP), com o objetivo de investigar uma anomalia a partir de um aumento de água em um instrumento situado na berma intermediária da estrutura. Esses métodos foram aplicados para mapear uma anomalia geofísica e identificar possíveis zonas de percolação ou outras heterogeneidades no interior da estrutura.

As aquisições foram realizadas em duas etapas, uma no fim de março e início de abril de 2020 e outra no início de setembro de 2020, ou seja, a primeira no fim do período chuvoso e a segunda em franco período seco.

O método de eletrorresistividade foi conduzido por meio da técnica de imageamento elétrico bidimensional (2D), também conhecida como tomografia elétrica 2D, utilizando o arranjo Schlumberger. Essa técnica é amplamente utilizada para caracterização geotécnica de estruturas, pois permite a visualização de variações de resistividade no subsolo, com boa resolução vertical. As medições foram realizadas ao longo de linhas geofísicas previamente estabelecidas, com os espaçamentos entre os eletrodos ajustados de acordo com a profundidade de investigação desejada.

O processamento dos dados de resistividade foi realizado utilizando o software RES2DINV, que realiza a inversão dos dados adquiridos e gera imagens bidimensionais da resistividade ao longo das seções investigadas. Para a geração das seções de resistividade, foi utilizado o software Geosoft, adotando-se a opção de curvatura mínima para interpolação dos dados. O tamanho das células do grid foi ajustado automaticamente, e a opção de escala logarítmica foi escolhida para evitar a apresentação de valores negativos durante o processo de inversão.

O método SP foi aplicado com uso de eletrodos não polarizáveis, registrados nas mesmas linhas geofísicas das medições utilizados no caminhamento elétrico. Esse método técnica foi utilizado para detectar fluxos naturais de água subterrânea, identificando gradientes eletrocinéticos que indicam zonas de movimentação de fluidos no interior da barragem. A combinação desses dois métodos oferece uma abordagem abrangente para identificar e caracterizar anomalias relacionadas ao comportamento hidráulico da estrutura.

3.2. Localização das linhas geofísicas

Foram realizadas sete linhas geofísicas, denominadas sequencialmente como: 1, 2, 2A, 3, 4, 5 e 6. Essas linhas, longitudinais e transversais, foram estrategicamente posicionadas para cobrir áreas representativas da estrutura da barragem, permitindo um mapeamento eficaz de

anomalias geofísicas a serem detectadas. As localizações dessas linhas estão ilustradas na Figura 1 e em todas foram executados o caminhamento elétrico e o SP.

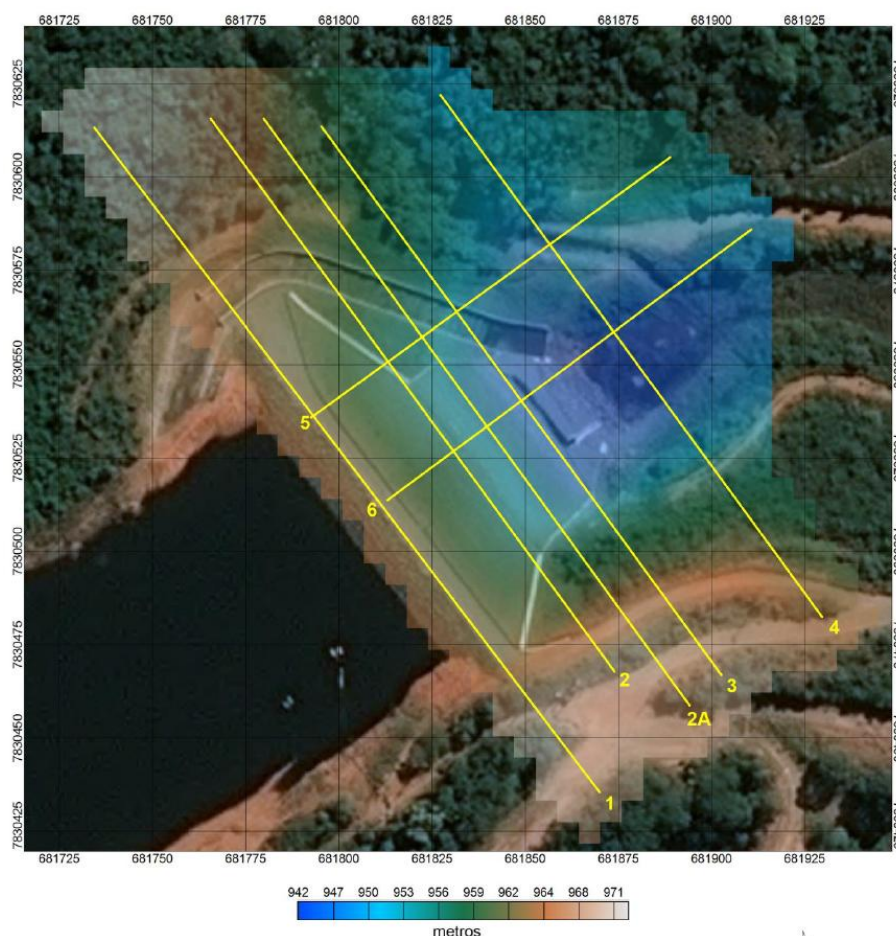
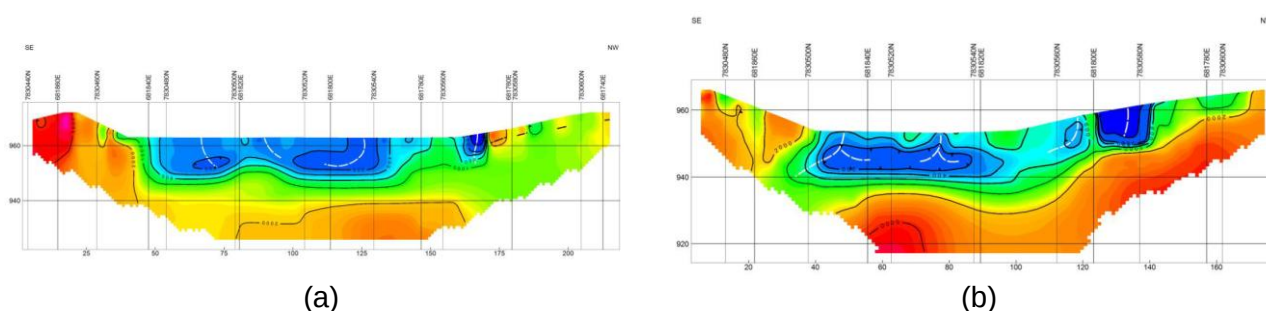


Figura 1. Localização das linhas geofísicas.

4. RESULTADOS

4.1. Imageamento Elétrico Bidimensional

Os resultados obtidos no levantamento realizado por meio do IE2D na primeira etapa da aquisição geofísica permitiu mapear anomalias de baixa resistividade, ou seja, zonas com maior umidade e/ou saturação, corroborando com as análises *in loco* a partir de pequenas escavações e instrumentação. Por outro lado, a fundação da barragem apresenta resistividade muito alta com cores laranja e vermelha. Na Figura 2 (b), em sua porção direita, com um azul forte, trata-se da estrutura do extravasor e não zonas de saturação. A seguir será apresentada a interpretação de todas as seções dispostas na Figura 2.



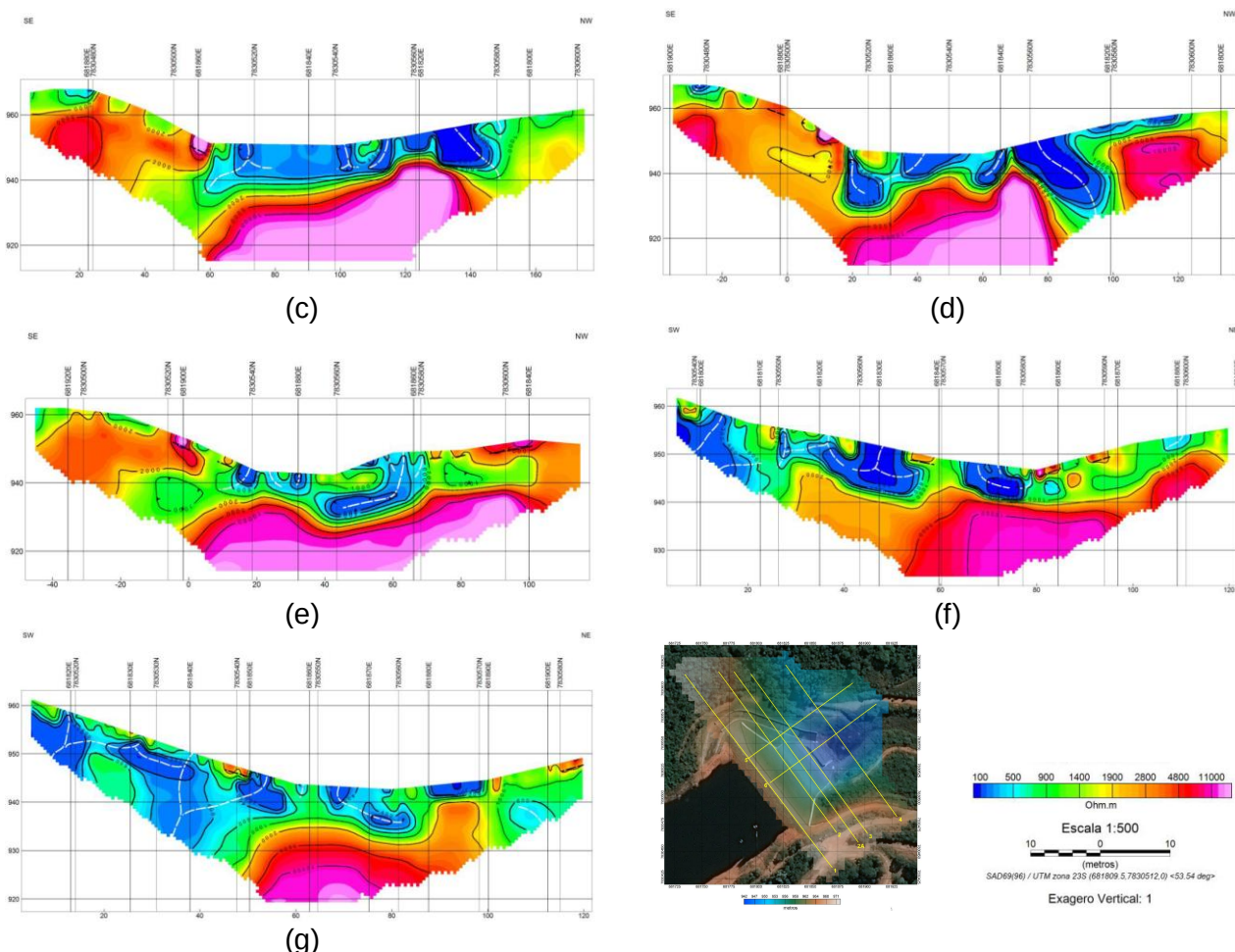


Figura 2. Linhas de caminhada elétrica com imageamento bidimensional: (a) Linha 1; (b) Linha 2; (c) Linha 2A; (d) Linha 3; (e) Linha 4; (f) Linha 5; (g) Linha 6.

Na Figura 2a, identifica-se uma extensa anomalia de forte intensidade (valores de resistividade entre 0 e 600 $\Omega.m$) entre as porções sudeste e central da seção, estendendo-se desde a superfície até a cota 947m. Outra anomalia de mesma intensidade é observada na porção noroeste, possivelmente associada ao extravasor, atingindo a cota 953m. O nível freático, quando estimado, encontra-se a cerca de 3m de profundidade.

A Figura 2b revela uma grande anomalia rasa, com resistividades entre 0 e 600 $\Omega.m$, entre as porções sudeste e central da seção, desde a superfície até a cota 938m. Verificam-se descontinuidades pontuais no padrão de resistividades baixas, com trechos apresentando valores de até 1000 $\Omega.m$. Uma anomalia adjacente, com características semelhantes, é observada na porção noroeste, novamente relacionada a estrutura do extravasor, possivelmente devido a presença de ferragens. Não foi possível estimar o nível freático nesta seção.

Na Figura 2c, destaca-se uma anomalia extensa entre as porções central e noroeste da seção, com resistividades entre 100 e 600 $\Omega.m$, atingindo aproximadamente a cota 938m, com um aprofundamento localizado até a cota 935m. Uma zona de maior intensidade, possivelmente associada ao extravasor, apresenta resistividades inferiores a 100 $\Omega.m$. Na região central, observa-se uma descontinuidade com valores entre 600 e 1000 $\Omega.m$. Já na porção sudeste, identifica-se uma anomalia superficial de menor intensidade (400 a 600 $\Omega.m$), que se estende até a cota 965 m. O nível freático estimado está a aproximadamente 4m de profundidade.

A Figura 2d apresenta uma anomalia contínua entre as porções central e noroeste da seção, composta por três zonas distintas. A primeira, com resistividades entre 100 e 600 $\Omega.m$, exibe uma descontinuidade superficial (600 a 2000 $\Omega.m$). A segunda, de forte intensidade e geometria subvertical, com resistividades entre 0 e 600 $\Omega.m$, é interpretada como estando relacionada a estrutura do extravasor. A terceira é uma anomalia superficial paralela à superfície, com

espessura de cerca de 4m. Adicionalmente, há uma anomalia superficial intensa na porção sudeste da seção. O nível freático, onde estimado, situa-se entre 2m e 4 m de profundidade.

Na Figura 2e, observam-se duas anomalias na porção central da seção, com resistividades entre 100 e 600 $\Omega.m$. A primeira é mais rasa e contínua, com pequena descontinuidade superficial. A segunda apresenta geometria complexa, com uma porção subvertical próxima da superfície e uma região sub-horizontal mais profunda (entre as cotas 929m e 937m), sendo parcialmente relacionada ao extravasor. Na extremidade sudeste, identifica-se uma anomalia de fraca intensidade (em torno de 600 $\Omega.m$). O nível freático estimado varia entre 2m e 3m de profundidade.

A Figura 2f evidencia uma anomalia de forte intensidade na porção sudoeste da seção, com resistividades entre 0 e 600 $\Omega.m$. Esta anomalia se estende até a cota 942 m e é acompanhada de uma descontinuidade pontual, cujos valores variam de 600 a 1000 $\Omega.m$. Na porção central da seção, há uma zona de transição com resistividades entre 600 e 1000 $\Omega.m$, atingindo pontualmente valores superiores a 1000 $\Omega.m$. Essa transição é interrompida por uma anomalia de média intensidade (100 a 600 $\Omega.m$) entre as cotas 936m e 938m. Na porção nordeste, observam-se duas anomalias: uma de maior intensidade, com valores entre 0 e 600 $\Omega.m$, até a cota 944m; e outra menos intensa, entre as cotas 949m e 951m. O nível freático, onde estimado, encontra-se a cerca de 2m de profundidade.

Por fim, a Figura 2g mostra uma extensa anomalia de baixa resistividade (entre 0 e 600 $\Omega.m$) ao longo de quase toda a seção, sugerindo elevada saturação do maciço. Observa-se uma descontinuidade pontual com resistividades entre 600 e 1000 $\Omega.m$ entre as cotas 946m e 950m, na porção central da seção. A partir dessa zona, a anomalia de baixa resistividade reaparece, com valores inferiores a 100 $\Omega.m$. Na porção nordeste, identifica-se uma zona de média resistividade (100 a 600 $\Omega.m$), até a cota 950 m. O nível freático estimado está a cerca de 2m de profundidade.

A análise das seções 2D (Figura 2) revela diversas anomalias de resistividade associadas a variações de saturação e possíveis influências do extravasor da barragem ao longo do trecho investigado, possivelmente devido as ferragens presentes no extravasor. As anomalias mais intensas foram observadas nas porções sudeste e noroeste das seções, com resistividades variando entre 0 e 600 $\Omega.m$, o que sugere áreas de maior saturação do maciço. Além disso, o nível freático foi estimado entre 2 e 4m de profundidade em várias seções, com descontinuidades e variações de resistividade evidenciando zonas de transição entre diferentes condições de saturação no maciço da estrutura.

4.2. Imageamento Elétrico Tridimensional

A partir dos resultados obtidos nas imagens 2D, foi possível construir o modelo 3D de variação de resistividade da área investigada, apresentado na Figura 3. A combinação das informações de todas as linhas levantadas nas duas etapas de aquisição permitiu gerar essa representação tridimensional, que facilita a visualização espacial das anomalias geofísicas detectadas. Comparado ao modelo 2D, o modelo 3D oferece uma visão mais clara e detalhada das variações de resistividade, permitindo uma melhor interpretação do comportamento das estruturas geológicas e do fluxo de água a partir do reservatório da barragem e da pluviometria.

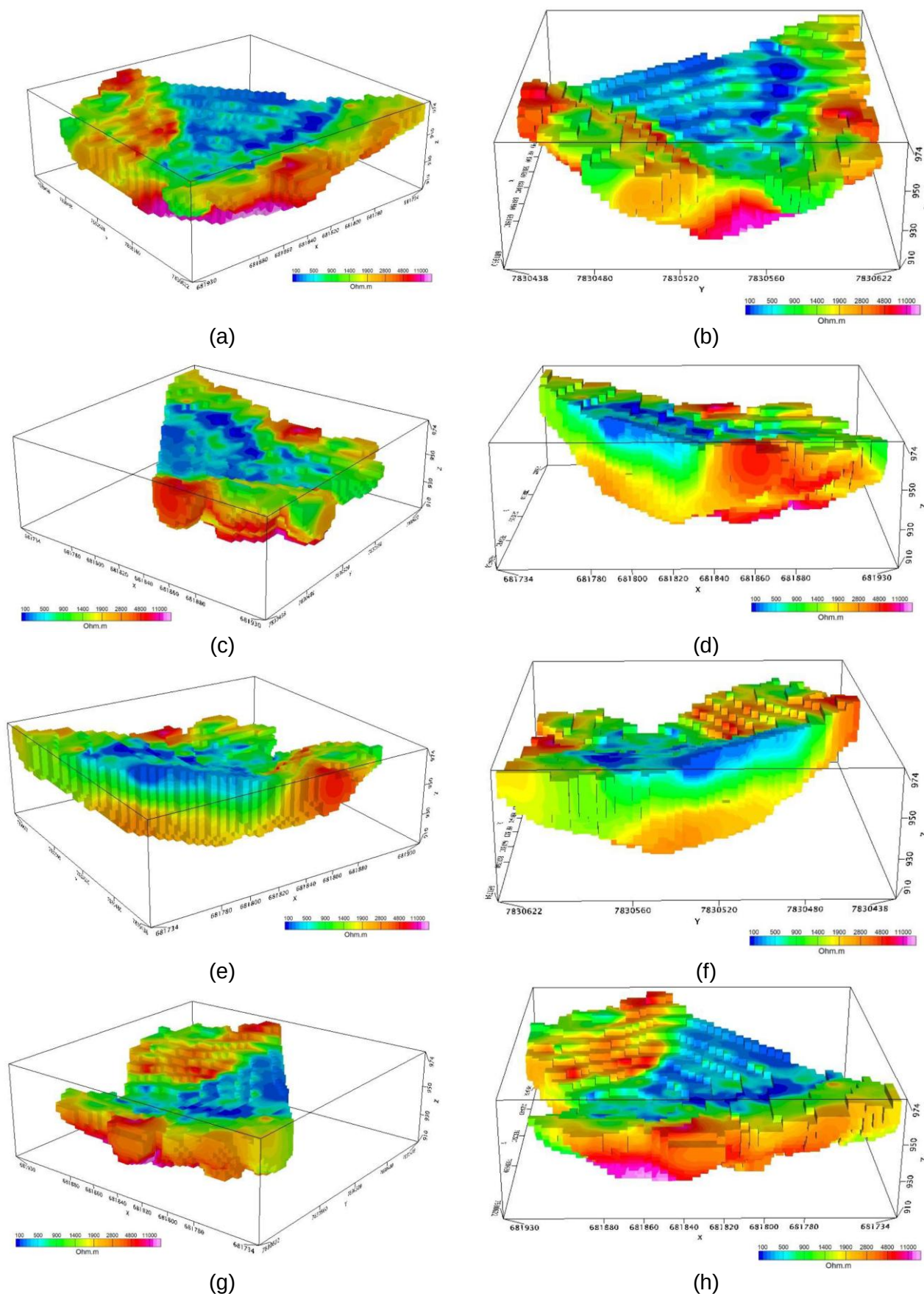


Figura 3. Imageamento tridimensional: (a) Vista nordeste; (b) Vista leste; (c) Vista sudeste; (d) Vista sul; (e) Vista sudoeste; (f) Vista oeste; (g) Vista noroeste; (h) Vista norte.

A representação tridimensional facilitou o mapeamento das variações de resistividade ao longo da área investigada, oferecendo uma visão mais intuitiva da distribuição espacial das zonas de alta e baixa resistividade, principalmente nas seções adquiridas na etapa 1 do levantamento geofísico. Além disso, o modelo 3D permitiu identificar com maior precisão o fluxo de água a partir do reservatório da barragem, evidenciando as direções do escoamento, algo que seria menos claro em uma análise 2D.

4.3. Mapa do Potencial Espontâneo

A Figura 4 apresenta o mapa do potencial espontâneo referente a etapa 1. É possível observar os baixos de potencial espontâneo (cores azuis) que indicam as possíveis zonas de entradas de água, com o fluxo, em geral, descendente, e os altos (em vermelho) indicando as possíveis zonas de saída, com fluxo ascendente. As setas sugerem as possíveis direções e os sentidos do fluxo, de montante para jusante.

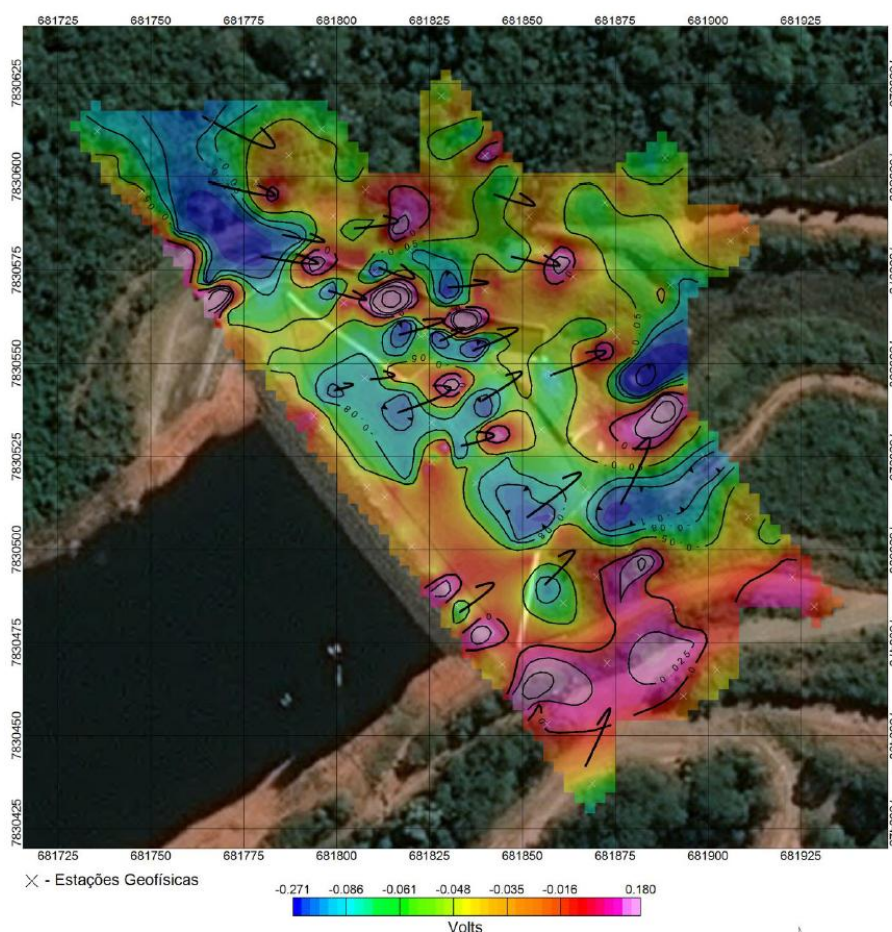


Figura 4. Mapa do potencial espontâneo.

A interpretação dos dados de SP (Figura 4) sugere a ocorrência de um padrão de fluxo d'água preferencial no interior do maciço, direcionado predominantemente de montante para jusante. A concentração de baixos valores de potencial (representados pelas tonalidades azuladas) em áreas próximas ao reservatório reforça a hipótese de percolação de água a partir da margem inundada. As zonas de alto potencial, indicadas em vermelho, situam-se principalmente na porção jusante do corpo da barragem. Essa configuração é compatível com o comportamento típico de fluxo em estruturas de contenção quando há presença de vias preferenciais de percolação. Além disso, a coerência entre os dados de SP e os resultados do caminhamento elétrico, que apontaram zonas de baixa resistividade coincidentes com os fluxos

ascendentes e descendentes, fortalece a interpretação conjunta dos métodos. Essa análise integrada contribui para a identificação de possíveis trajetos de fluxo subterrâneo e subsidia a definição de medidas de monitoramento e remediação, caso necessário.

5. CONCLUSÕES

A aplicação integrada dos métodos geofísicos com os métodos de caminhamento elétrico e potencial espontâneo permitiu uma avaliação eficiente quanto ao fluxo de água na barragem em estudo, principalmente nas linhas adquiridas na etapa 1.

Os dados de eletrorresistividade indicaram a existência de regiões com valores reduzidos de resistividade elétrica, sobretudo na porção central do maciço, o que sugere a presença de vias preferenciais de percolação. Essas zonas podem estar associadas a materiais mais saturados devido a presença de materiais mais permeáveis no maciço e/ou a descontinuidades que favorecem o fluxo de água ascendente.

Os resultados de potencial espontâneo complementaram essa interpretação, ao evidenciarem áreas de baixos potenciais (associadas à entrada de água no maciço) e de altos potenciais (indicando possível saída de água), com fluxos predominantemente direcionados de montante para jusante. As direções sugeridas pelos gradientes de potencial são compatíveis com padrões típicos de infiltração em estruturas de contenção com possíveis caminhos condutivos internos.

A consistência entre os resultados obtidos por ambos os métodos reforça a confiabilidade das interpretações realizadas. Essa abordagem integrada representa uma ferramenta importante no diagnóstico de segurança de barragens, contribuindo para a definição de medidas de monitoramento, manutenção e, quando necessário, intervenções corretivas que assegurem a estabilidade da estrutura e a proteção ambiental associada.

AGRADECIMENTOS

A VALE S.A. pelos dados cedidos para a realização desse trabalho e a STATUM pela análise dos resultados obtidos no estudo de As Is.

REFERÊNCIAS

- BINLEY, A. & KEMNA, A. (2005) “DC resistivity and induced polarization methods” in https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5_5.
- CHAMBERS, J.E., WILKINSON, P.B., KURAS, O., FORD, J.R., GUNN, D.A., & MELDRUM, P.I. (2014) “Non-invasive geophysical monitoring of geohazards: A review of potential applications and future challenges” in *Engineering Geology*, nº 179, p.124–135.
- JONGMANS, D., & GARAMBOIS, S. (2007) “Geophysical investigation of landslides: A review” in *Bulletin de la Société Géologique de France*, nº 178(2), p.101–112.
- LOKE, M.H., CHAMBERS, J.E., RUCKER, D.F., KURAS, O., & WILKINSON, P.B. (2013) “Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method” in *Journal of Applied Geophysics*, nº 95, p.135–156.
- MOTA, L.H.C., VIEIRA, C.A., & MACEDO, R.R. (2021) “Aplicação de métodos geofísicos para investigação de anomalias em barragens: estudo de caso” in *Revista Brasileira de Geofísica*, nº 39(2), p. 145–158.

REVIL, A., NAUDET, V., NOUZARET, J., & PESSEL, M. (2005) "*Principles of electrography applied to self-potential electrokinetic sources and hydrogeological applications*" in *Geophysical Journal International*, nº 160(2), p.444–457.