

CORRELAÇÃO ENTRE MÉTODOS ELÉTRICOS E GEOTÉCNICOS EM BARRAGEM DE TERRA DE PEQUENO PORTE

Júlia Lopes FIGUEIREDO ¹; Ananda Assumpção CARNEIRO ²; Eduardo Antonio Gomes MARQUES ³; Bárbara Emilly Vieira Firmino e SOUZA ⁴; Inácio Diniz CARVALHO ⁵; Cibele CLÁUVER ⁶.

Resumo – A integração entre métodos geotécnicos e métodos geofísicos permite uma análise mais completa de dados, especialmente em estruturas como barragens, as quais requerem constante monitoramento e inspeção. Esse estudo avaliou a correlação entre resultados da sondagem Standard Penetration Test (SPT), e técnicas de eletrorresistividade, Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Sondagem Elétrica Vertical Multi Eletrodos (SEVME), na crista de uma barragem de terra de pequeno porte. Relacionando-se a sondagem SPT à SEV, ambas as técnicas identificaram a presença de uma camada de solo em aproximadamente 6,50 m. Os dados de SEV e SEVME indicaram a redução de resistividade aparente do subsolo conforme a profundidade, associado à percolação de água no maciço da barragem. Buscando maior integração e correlação entre os métodos e dados, foi desenvolvido um modelo de visualização tridimensional que evidencia os resultados obtidos.

Abstract – The integration of geotechnical and geophysical methods enables a more comprehensive data analysis. This is especially important for structures such as dams that require continuous monitoring and inspection. This study assessed the correlation between Standard Penetration Test (SPT) results and electrical resistivity techniques, including Vertical Electrical Sounding (VES) and Electrical Resistivity Tomography (ERT), at the crest of a small earth dam. By correlating SPT data with VES, both techniques identified a soil layer at approximately 6.50 m depth. VES and ERT data showed a decrease in apparent resistivity with depth. This behavior is associated with water percolation within the dam structure. To enhance the integration and correlation of methods and data, a three-dimensional visualization model was developed to highlight the obtained results.

Palavras-Chave – Barragem; Geofísica; Geotecnia; Sondagem.

¹ Eng., BSc Universidade Federal de Viçosa, (31) 3612-6138, julia.l.figueiredo@ufv.br

² Eng., Universidade Federal de Viçosa, (31) 3612-6138, ananda.carneiro@ufv.br

³ Geól., PhD., Universidade Federal de Viçosa, (31) 3612-6138, emarques@ufv.br

⁴ Eng., Msc, VALE S.A, (31) 3691-4300, barbara.vieira.souza@vale.com

⁵ Geól., PhD, VALE S.A, (31) 3691-4300, inacio.carvalho@vale.com

⁶ Eng Geol., PhD, Universidade Federal de Viçosa, (31) 3612-6138, cibele.clauver@ufv.br

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das condições geotécnicas do maciço de uma barragem de terra é essencial para assegurar a estabilidade e segurança da estrutura ao longo de sua vida útil, especialmente quando há possível percolação de água em seu interior. Dentre os métodos de investigação geológico-geotécnica convencionais, o mais utilizado no Brasil é a sondagem à percussão *Standard Penetration Test* (SPT), a qual fornece informações pontuais sobre a resistência e estratigrafia do subsolo. Nos últimos anos os métodos geofísicos vêm sendo amplamente incorporados à investigação geotécnica de campo para incrementar a avaliação do subsolo a partir de ensaios não destrutivos, os quais integram os métodos geológico-geotécnicos e possibilitam uma avaliação mais criteriosa da estrutura com modelagens em até três dimensões (Rezende et al., 2024).

Dentre os métodos geofísicos destacam-se, neste estudo, a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e a Sondagem Elétrica Vertical MultiEletrodos (SEVME), as quais fornecem dados através da prospecção geolétrica de resistividade no subsolo. A SEV consiste na investigação linear vertical da resistividade aparente do solo conforme sua profundidade, enquanto a SEVME propicia a construção de um modelo bidimensional da resistividade elétrica interna do maciço.

Desse modo, o uso integrado dos métodos acima descritos propicia a execução de investigações geológico-geotécnicas mais completas e precisas. A correlação dos dados assim obtidos proporciona resultados mais consistentes e conseqüentemente uma melhor caracterização do local investigado, resultando em maior confiabilidade nas operações e nos projetos de engenharia de barragens.

2. METODOLOGIA

2.1. Área investigada

A área de estudo corresponde a uma barragem de terra de pequeno porte localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa, Minas Gerais, ilustrada na Figura 1. Os ensaios foram realizados na crista da barragem e nos taludes de montante e jusante.



Figura 1. Barragem de terra da UFV.

Fonte: Google Earth (adaptado).

2.2. Sondagem à Percussão - Standard Penetration Test (SPT)

As sondagens à percussão foram executadas em três pontos na crista da barragem, denominados como “Furo 01b”, “Furo 02” e “Furo 03”, conforme exposto na Figura 2. Para fins de comparação com os demais resultados na sequência deste trabalho, destaca-se o “Furo 01b”, indicado pela seta azul.

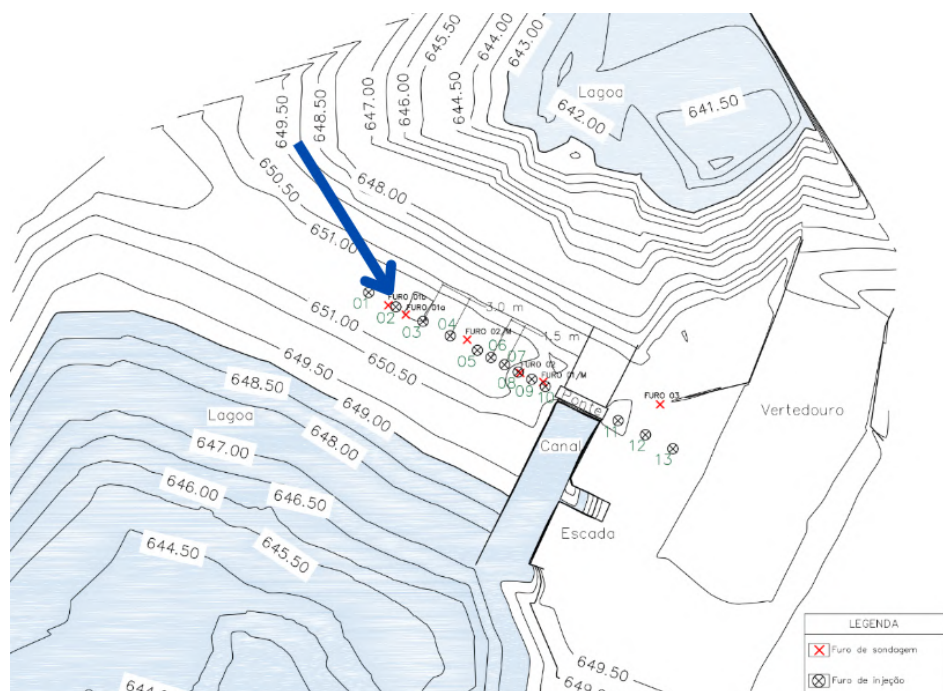


Figura 2. Posição dos furos de sondagem SPT.

Fonte: Relatório Técnico, 2018 (adaptado).

2.3. Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

A SEV é uma técnica geofísica baseada na medição da variação vertical da resistividade aparente do solo em função da sua profundidade, permitindo a análise de suas propriedades geelétricas em diferentes estratos. A medida da resistividade aparente é realizada por meio de eletrodos de alumínio cravados no solo e um resistímetro, sendo a disposição e o afastamento entre os eletrodos determinados pelo arranjo adotado para a aquisição dos dados.

A aquisição dos dados de SEV foi realizada através de um resistímetro, com o arranjo de eletrodos Schlumberger, escolhido por oferecer melhor resolução vertical, bem como maior profundidade de investigação em comparação a outros arranjos (Leite e Macedo, 1982). Nessa configuração, os eletrodos de medição de potencial (M e N) localizam-se no centro com uma distância entre eles inicialmente definida em 0,5 m, permanecendo fixos durante a aquisição. Já os eletrodos de medição de corrente (A e B), com espaçamento L , variam uniformemente para fora de M e N , de acordo com a ilustração da Figura 3 (Lopes, 2023). A relação entre as distâncias entre os pares de eletrodos é dada por $MN \leq AB/5$, de acordo com Cutrim et al (2007), Moreira, Dourado e Santos (2007) e Braga (2016).

De acordo com De Siqueira Neto (2022), o comprimento da linha de investigação, ou seja, a distância máxima entre os eletrodos de corrente A e B , influencia na profundidade alcançada no ensaio, de forma que, quanto maior o afastamento, maior é a distância, assim como é observado na Figura 3. Registra-se que, para as aquisições dos dados, o centro da SEV foi posicionado o mais próximo possível do Furo 01b e a linha de investigação posicionada em uma direção onde seu comprimento fosse o máximo possível apesar das limitações de campo, totalizando cerca de 50m.

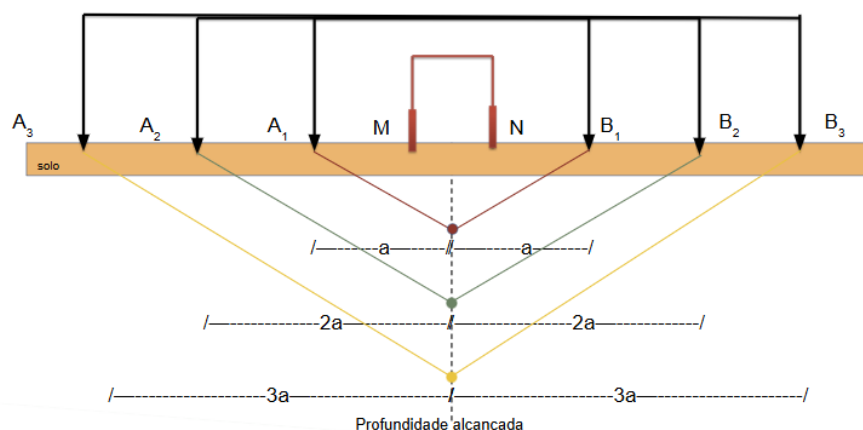


Figura 3. Arranjo Schlumberger.

Após a coleta, esses dados foram processados com o uso do *software* IPI2win para a inversão.

2.4. Sondagem Elétrica Vertical Multi Eletrodos (SEVME)

A SEVME, também conhecida como caminhamento elétrico, possibilita a análise horizontal de resistividade do subsolo com investigações laterais dos parâmetros em diversas profundidades (Nogueira, 2022). Semelhante à SEV, os eletrodos são divididos em eletrodos de potencial (M e N) e eletrodos de corrente (A e B), no entanto, o arranjo utilizado foi o Dipolo-Dipolo, ilustrado na Figura 4.

Nesse arranjo, os dipolos AB permanecem fixos na primeira sequência de leituras até que o dipolo MN se desloque até o final da linha. As leituras se repetem até que os dois dipolos cheguem aos quatro eletrodos finais da linha de investigação. O nível de investigação se aprofunda conforme o comprimento da linha de eletrodos aumenta, uma vez que, a interseção entre as linhas que partem do centro de AB e as que saem do centro de MN formam um ângulo de 45° , determinando a profundidade de investigação (De Siqueira Neto et al., 2023). Nesse estudo, o espaçamento “x” entre os eletrodos foi de 1 m.

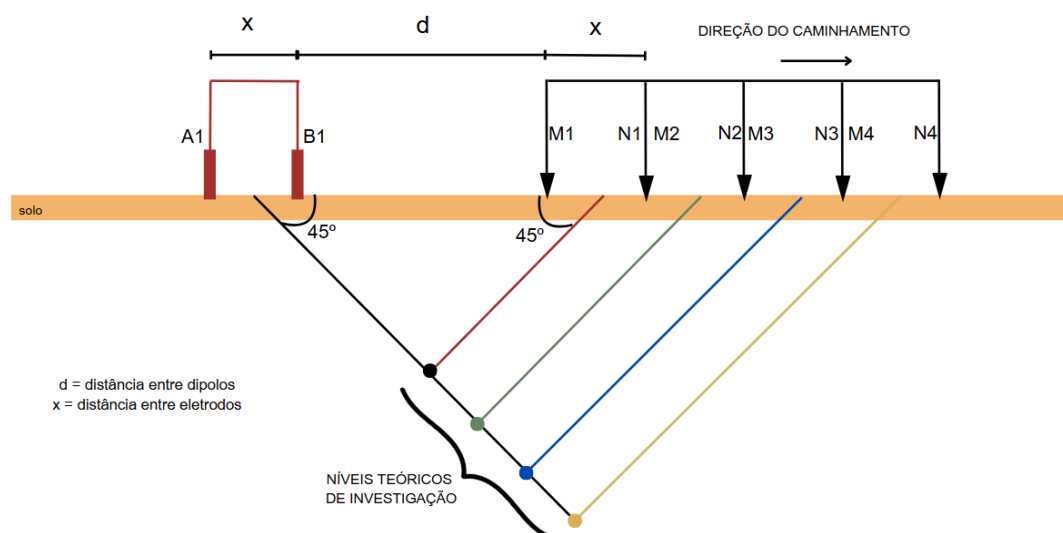


Figura 4. Arranjo Dipolo-Dipolo.

No estudo elaborado por Soares *et al.* (2024), foram realizadas cinco SEVMEs nas linhas de investigação retratadas na Figura 5, na crista da barragem. Em uma primeira análise, para comparação imediata com os dados de SEV e SPT devido a sua localização, a linha “L04”, com

91 m de extensão, foi utilizada. No avanço das interpretações, as demais sessões foram empregadas na construção do modelo tridimensional. Os dados coletados foram processados no *software* RES2DINV para a construção do modelo bidimensional.

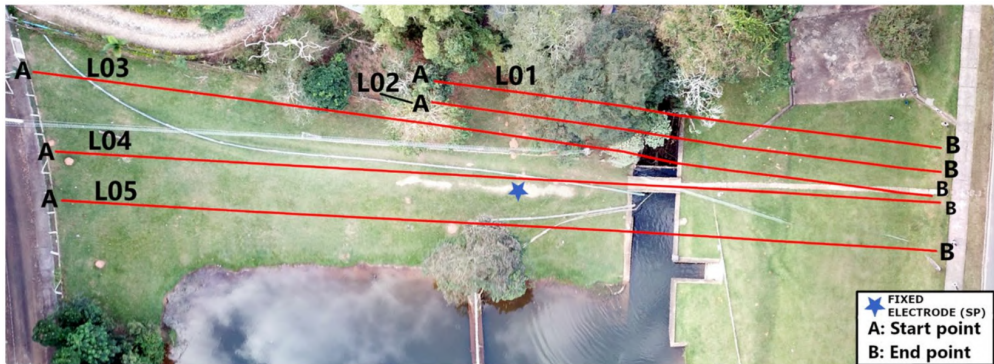


Figura 5. Perfis de investigação para SEVME.

Fonte: Soares *et al.*, 2024.

3. RESULTADOS

3.1. Sondagem SPT

Os resultados da sondagem SPT no Furo 01b estão apresentados na Figura 6.

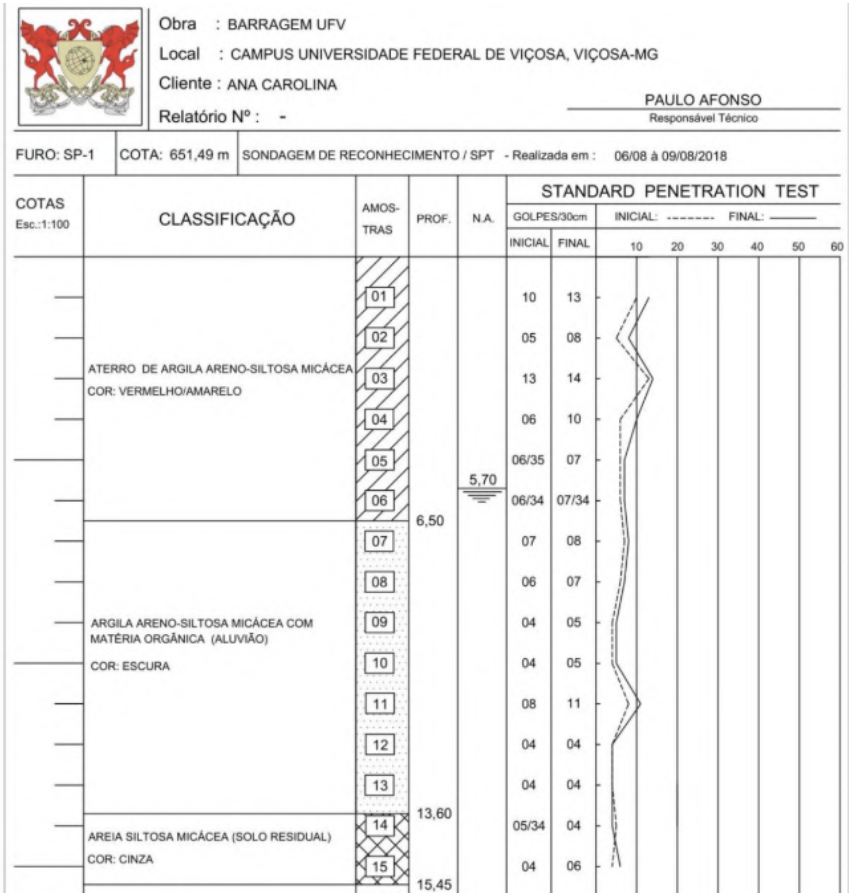


Figura 6. Relatório de sondagem SPT - Furo 01b.

Fonte: Relatório Técnico, 2018.

Os dados obtidos indicam a presença de três camadas no solo: a primeira com espessura de 6,50 m, contendo aterro de argila areno-siltosa micácea vermelha/amarela; a segunda, com espessura de 7,1m, composta por argila areno-siltosa micácea escura com matéria orgânica; e a última, com espessura de 1,85 m com presença de argila areno-siltosa micácea cinza. Os valores de NSPT são apresentados para cada metro de profundidade e o nível d'água (NA) foi registrado a 5,70 m.

3.2. SEV

O resultado da inversão dos dados da SEV está apresentado na Figura 7. A tabela exibe as resistividades (ρ), espessuras (h) e profundidades (d) de investigação. A interpretação do perfil elétrico resulta em 3 camadas geoeletricas: camada 1 até 0,876 m; camada 2 entre 0,876 m e 3,16 m; e a camada 3 de 3,16 m até 6,32m. Observa-se que a quarta camada do resultado apresentado corresponde a um ramo ascendente com valor crescente de resistividade, formando uma inclinação de aproximadamente 45° no gráfico bilogarítmico. Essa última camada é desconsiderada da interpretação geológica-geotécnica, uma vez que, após a base da camada 3, não há parâmetro de referência para integração dessa camada ao resultado final. Quanto aos valores de resistividade nas três camadas definidas, é importante ressaltar que estes diminuem com o aumento da profundidade.

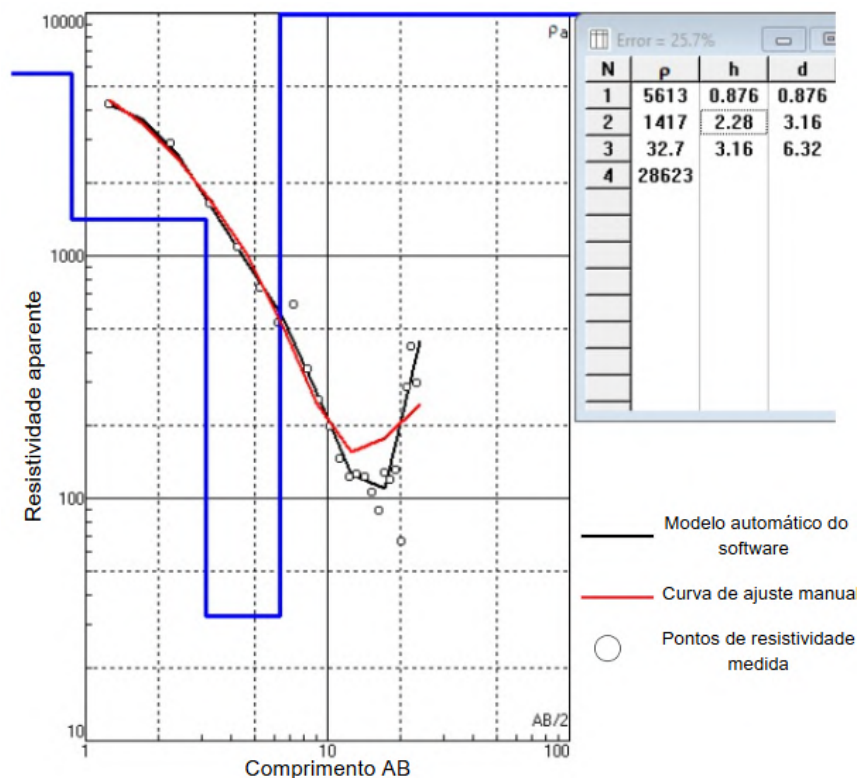


Figura 7. Resultado da inversão de dados da SEV.

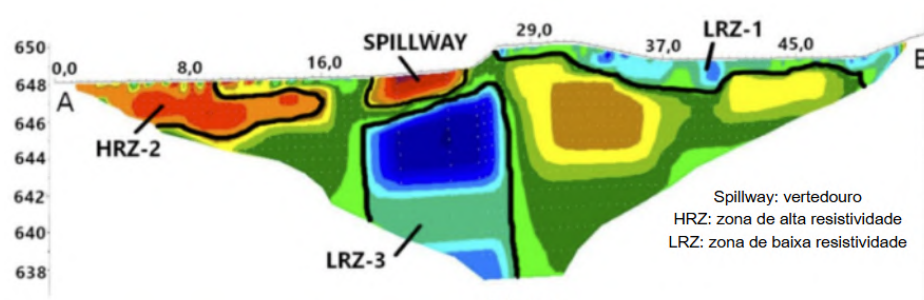
3.3. SEVME

O resultado do processamento dos cinco perfis de SEVME adquiridos no maciço da barragem estão indicados na Figura 8. Nota-se a existência de zonas de alta (HRZ = *high resistivity zone*) e baixa (LRZ = *Low Resistivity Zone*) resistividade nos perfis apresentados. As HRZ decorrem da presença de solos com baixa resistência, bem como de formigueiros e árvores, os quais aumentam o índice de vazios do solo e, conseqüentemente, elevam a resistividade aparente do meio (Soares *et al.*, 2024).

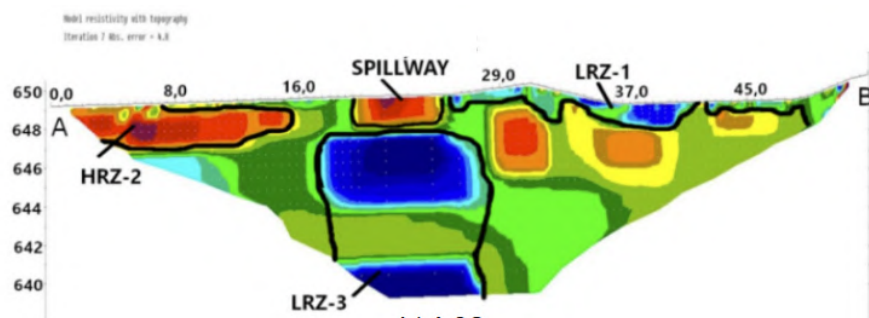
Soares *et al.* (2024) detectaram três pontos distintos de percolação de água no maciço da barragem, associados às zonas condutivas representadas pela LRZ-1, LRZ-2 e LRZ-3. Com

influência de chuvas intensas próximas ao dia de coleta de dados, a LRZ-1 representou uma zona de infiltração, a LRZ-2, o nível d'água da barragem, enquanto a LRZ-3 delimitou um caminho preferencial de percolação da água, localizada abaixo do vertedouro.

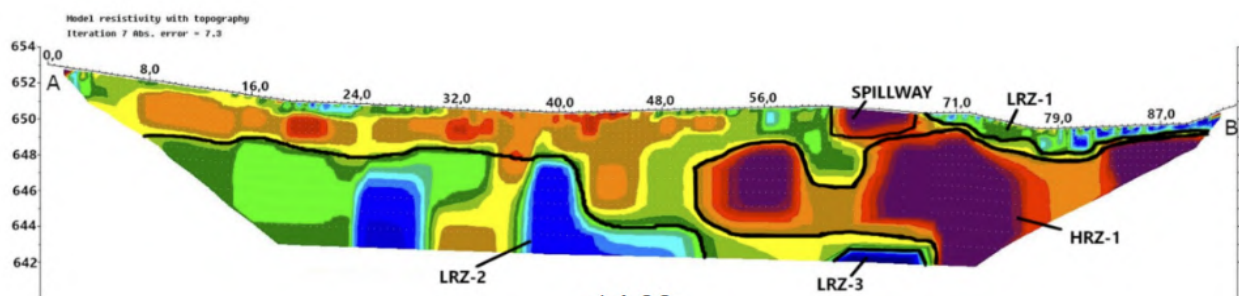
Na L04 está apontada a localização da SEV e da sondagem SPT realizada, representando o Furo 01b.



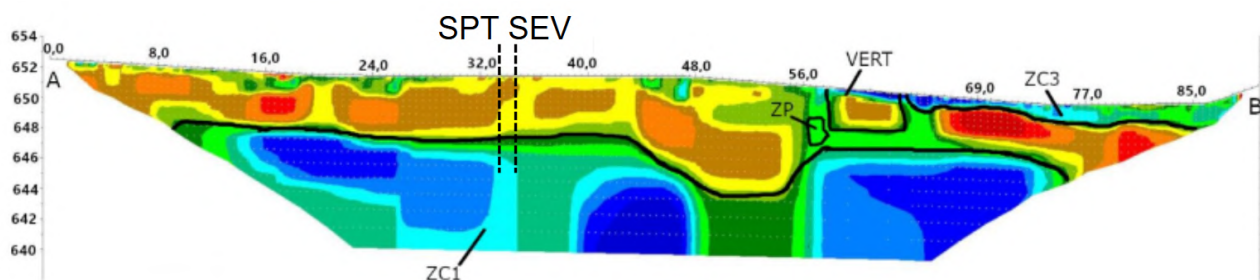
a) L01



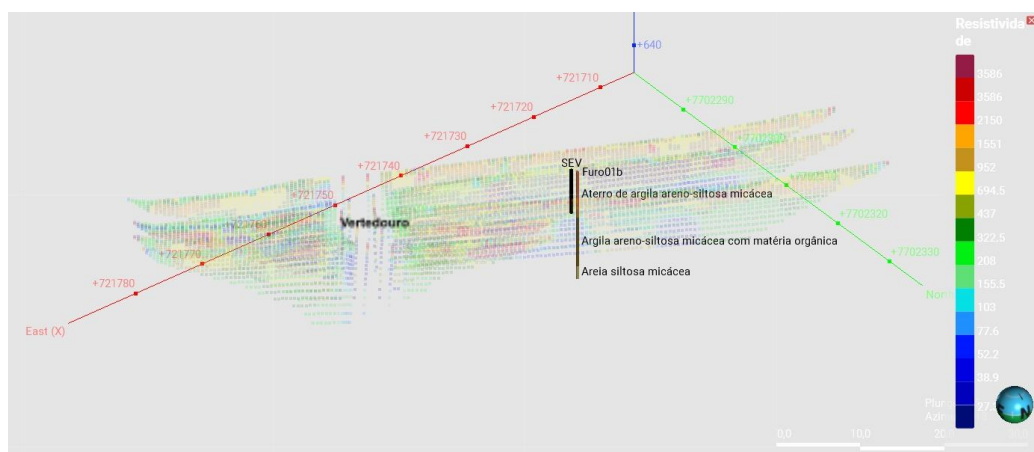
b) L02



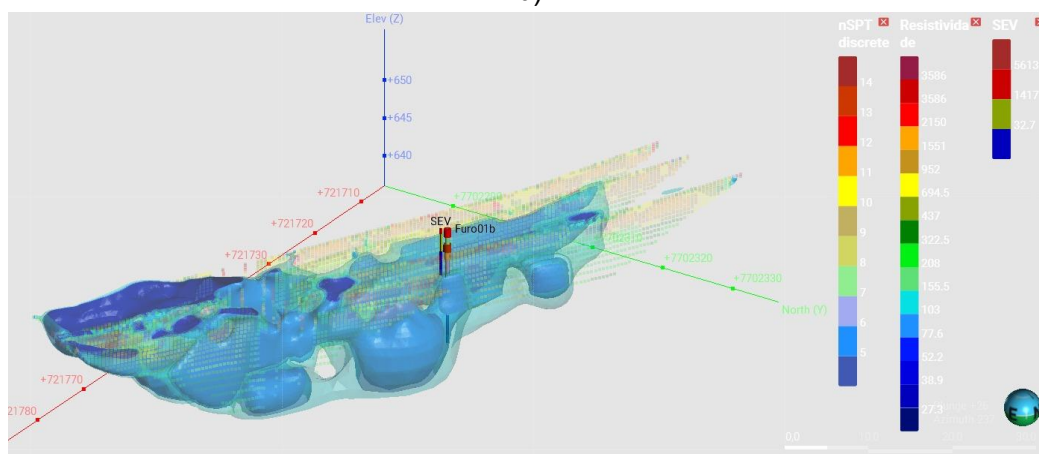
c) L03



d) L04



b)



c)

Figura 9. Modelo tridimensional. a) SPT com diferentes espessuras; b) SPT com variação estratigráfica; c) Volume de resistividade, destacando-se as zonas de menor resistividade.

4. CONCLUSÕES

A investigação por métodos geofísicos e geológico-geotécnicos na barragem de terra da UFV evidenciou a importância da integração entre métodos convencionais, como a sondagem SPT, e os geofísicos, como a SEV e a SEVME, para uma avaliação mais precisa e completa do subsolo. A correlação entre os métodos permite suas aplicações em diversas áreas, de acordo com os objetivos de estudo e das condições locais para escolha de métodos diretos ou indiretos.

Os resultados obtidos a partir da SEV e SEVME demonstraram que há uma redução dos valores de resistividade aparente, coincidente com o fato de haver percolação de água na barragem. Ademais, a compatibilidade entre os dados das sondagens SPT e da SEV na identificação de uma camada reforça a confiabilidade da integração entre as técnicas.

Por fim, a construção de um modelo tridimensional englobando todas as sondagens auxiliou na identificação de zonas de alta e baixa resistividade na barragem, aprimorando análises da estrutura e contribuindo para uma avaliação mais detalhada de suas condições a partir de métodos indiretos. Essa abordagem reforça a relevância do papel da Geofísica quando aliada à Geotecnia, especialmente na compreensão e monitoramento de estruturas de barragens.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA) da UFV, à Vale S.A pelo incentivo e financiamento da pesquisa, e a todos os colaboradores que ajudaram na aquisição de dados.

REFERÊNCIAS

AYALA-CABRERA, K. (2022) *“Caracterización geotécnica mediante la correlación geológica-geofísica de un área piloto para la planificación territorial de la ZEDE”*. Tesis de Maestría, Maestría en Geotecnia, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 20p.

BRAGA, A. C. O. (2016) *Geofísica aplicada: métodos geoelétricos em hidrogeologia*. Oficina de Textos, ISBN: 978-85-7975-191-2, São Paulo. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 10 mar. 2025.

CUTRIM, A. O. et al. (2007) *“Sondagem elétrica vertical aplicada em pesquisa hidrogeológica na Bacia do Parecis, MT”* em Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, p. 131-140.

DE SIQUEIRA NETO, A. C. et al. (2023) *“Método da eletrorresistividade aplicado à variação temporal do nível freático do aquífero Alter do Chão, em Santarém, Pará”* em Revista de Geociências do Nordeste, v. 9, n. 1, p. 88-104, 2023..

DE SIQUEIRA NETO, A. C.; DE SIQUEIRA, F. R. P. S. (2022). *“Delimitação de nascente soterrada utilizando método da eletrorresistividade na cidade de Cuiabá, MT”* em Geologia USP. Série Científica, v. 22, n. 3, p. 18-31

LOPES, W. R. (2023) *“Método de eletrorresistividade integrado com dados aeromagnéticos e sondagem mecânica aplicado ao estudo de mármore calcítico na área da Mina Cerro da Cadeia em Vila Nova do Sul – RS”*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal do Pampa, 91p.

MOREIRA, C.A., DOURADO, J.C., DOS SANTOS, K. (2007) *“Geofísica aplicada no estudo de área de lançamento de efluentes de tratamento de esgoto”* em Geociências, v. 26, n. 1, p. 17-25.

NOGUEIRA, C.E.C. (2022) *“Utilização do levantamento de eletrorresistividade para prospecção de gemas em pegmatitos”*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Tecnologia, Ambiente e Sociedade, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 66p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (2018) *“Relatório técnico - Injeção de calda de cimento - Barragem UFV”*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.

REZENDE, L. et al. (2024) *“Integrated geophysical methods in identifying preferential flow paths in an earth dam.”* In Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, p. 21.

SOARES, L. F. C. et al. (2024) *“Geophysical research applied to the evaluation of percolation conditions of an earth dam.”* in Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 83, n. 8, p. 343.