

Avaliação do Método de Tomografia de Resistividade Elétrica em *Time-Lapse* como Ferramenta para o Monitoramento Geotécnico

Edson Iurk Junior

Discente, PPGEC-UFPR *, Curitiba, Brasil, edson.iurk@ufpr.br

Andrés Miguel Gonzales Acevedo

Docente, PPGEC-UFPR, Curitiba, Brasil, andres.gonzalez@ufpr.br

* Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Paraná.

RESUMO: Os eventos de deslizamento de terra foram recorrentes nos últimos anos. Entre eles, podem ser citados os ocorridos nas estradas paranaenses no final de 2022 e no litoral norte de São Paulo no início de 2023. Esses eventos trazem ao centro da discussão as metodologias de monitoramento das estruturas de terra, especialmente quanto ao grau de saturação como principal agente desencadeador das rupturas. O objetivo deste trabalho é apresentar uma avaliação do método de Tomografia de Resistividade Elétrica em *Time-Lapse* (tl-TRE) quanto a sua eficácia no monitoramento da percolação de água em um talude natural. Para isso, foi selecionado um terreno na região metropolitana de Curitiba, onde foi instalada uma linha de Tomografia de Resistividade Elétrica (TRE) e efetuadas medições periódicas de resistividade em momentos estratégicos que possam ser correlacionados em função das séries históricas de pluviosidade. Os métodos de resistividade elétrica são amplamente difundidos na caracterização de estruturas geológicas e geotécnicas e são capazes de delimitar áreas com maior concentração de fluidos nos poros das rochas e solos. Com os dados de resistividade em função do tempo, espera-se compreender a dinâmica de percolação de água e a resposta da resistividade elétrica em função do grau de saturação.

PALAVRAS-CHAVE: Eletroresistividade, Geofísica aplicada, Monitoramento Geotécnico, Movimentos de massa, Saturação do solo.

ABSTRACT: The landslides events have been recurring in recent years. Among them, those occurred on the Paraná roads at the end of 2022 and on the northern coast of São Paulo in early. These events bring to the forefront the discussion on methodologies for monitoring these earth structures, especially regarding the soil saturation as the main triggering agent for ruptures. The aim of this work is to present an evaluation of the Electrical Resistivity Tomography in *Time-Lapse* (tl-ERT) method regarding its effectiveness in monitoring water percolation in a natural slope. For this purpose, a site in the metropolitan region of Curitiba was selected, where a line of Electrical Resistivity Tomography (ERT) was installed, and periodic resistivity measurements were taken at strategic moments that can be correlated with historical rainfall data. Electrical resistivity methods are widely used in the characterization of geological and geotechnical structures and are capable of delimiting areas with a higher concentration of fluids in the pores of rocks and soils. With resistivity data over time, it is expected to understand the dynamics of water percolation and the response of electrical resistivity as a function of the soil saturation.

KEYWORDS: Electrical Resistivity, Applied Geophysics, Geotechnical Monitoring, Land Slides, Soil Saturation.

1 INTRODUÇÃO

Macedo e Sandre (2022), em pesquisa ao banco de dados de fatalidades em movimentos de massa, mantido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), mostram que, de 1988 a junho de 2022, houve 959 eventos catalogados, totalizando 4146 mortes, com uma média anual de 118 vítimas.

Em novembro de 2022, uma série de deslizamentos de terra provocou uma morte e o bloqueio total das rodovias BR-376 e BR-277 na região da serra do mar paranaense, o que causou prejuízos e perdas estimadas

em R\$ 9 milhões por semana, segundo a Federação das Empresas de Transportes de Cargas do Paraná (FETRANSPAR, 2022).

Diante do exposto, considerando a frequência elevada de ocorrência desses fenômenos e a susceptibilidade das comunidades que ocupam regiões de risco, bem como a dependência econômica dos equipamentos de infraestrutura que são diretamente afetados por esses eventos, as técnicas de monitoramento das condicionantes geotécnicas de movimentos de massa são importantes ferramentas na prevenção de mortes e prejuízos tanto econômicos como sociais. Para atender essas necessidades, a técnica de monitoramento geotécnico com utilização de Tomografia de Resistividade Elétrica em *Time-lapse* se torna uma importante ferramenta na identificação de condicionantes de desestabilização geotécnica previamente aos eventos de desastre.

É notável a importância em se conhecer o comportamento da água de percolação nos maciços, possibilitando a correta avaliação da segurança contra o rompimento dessas estruturas. Ainda, a quantidade de água presente em uma massa de solo varia ao longo do tempo devido às variações nas taxas de pluviosidade e infiltração, causando oscilações nos níveis freáticos e no estado de tensões dos maciços.

Portanto, a avaliação de uma metodologia quanto à sua capacidade de mensurar essas variações na quantidade de água existente nos poros de um maciço terroso ao longo do tempo traz várias vantagens em termos de monitoramento de estabilidade de taludes e encostas, como a avaliação da segurança ao longo do tempo e custos reduzidos de instalação e operação em comparação aos métodos tradicionais de monitoramento.

Nesse contexto, os métodos geoeletricos vem sendo constantemente utilizados para caracterizar o fluxo de água subterrânea em deslizamentos de terra ou em encostas e taludes aparentemente estáveis, como forma de compreender os mecanismos de ruptura e os efeitos da água nos levantamentos de tomografia elétrica (Calamita et al., 2023; Hen-Jones et al., 2017; Gunn et al., 2015).

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a utilização do método de tl-TRE (Tomografia de Resistividade Elétrica em Time Lapse) e sua aplicabilidade para o monitoramento geotécnico, como ferramenta para análise dos parâmetros de saturação do solo e sua evolução ao longo do tempo. Para isto, foi selecionado um campo experimental localizado no município de Colombo (PR) para instalação de uma linha de Tomografia Elétrica, onde foram executados levantamentos periódicos de resistividade elétrica para comparação com os dados de pluviometria e teores de umidade natural do solo. Os critérios de seleção do sítio experimental foram a facilidade de acesso e a segurança do local para realização de medições periódicas semanais, considerando que o equipamento utilizado é de operação manual e de propriedade do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada do departamento de Geologia da UFPR (LPGA-UFPR).

2 METODOLOGIA

2.1 Geologia da área

Para entendimento do contexto geológico e geotécnico da área de estudo, foi realizada uma consulta às bases cartográficas e geológicas disponíveis. De acordo com o mapa geológico da Folha de Curitiba (MINEROPAR, 2005), a área de estudo se situa sobre os sedimentos da formação Guabirota, constituída por argilas, arcósios, areias e cascalhos. No sítio experimental, predominam os solos argilosos de colocação cinza e de consistência bastante elevada (rija a dura), com uma camada superficial de solo residual argilo-arenoso, de menor consistência e colorações marrom avermelhadas, condizente com o perfil típico dos solos sedimentares da formação Guabirota (Kormann, 2002). Foram realizadas quatro sondagens a trado para elaboração do perfil geotécnico, onde foram coletadas amostras para obtenção do teor de umidade natural. A estratigrafia do terreno pode ser observada na figura 1.

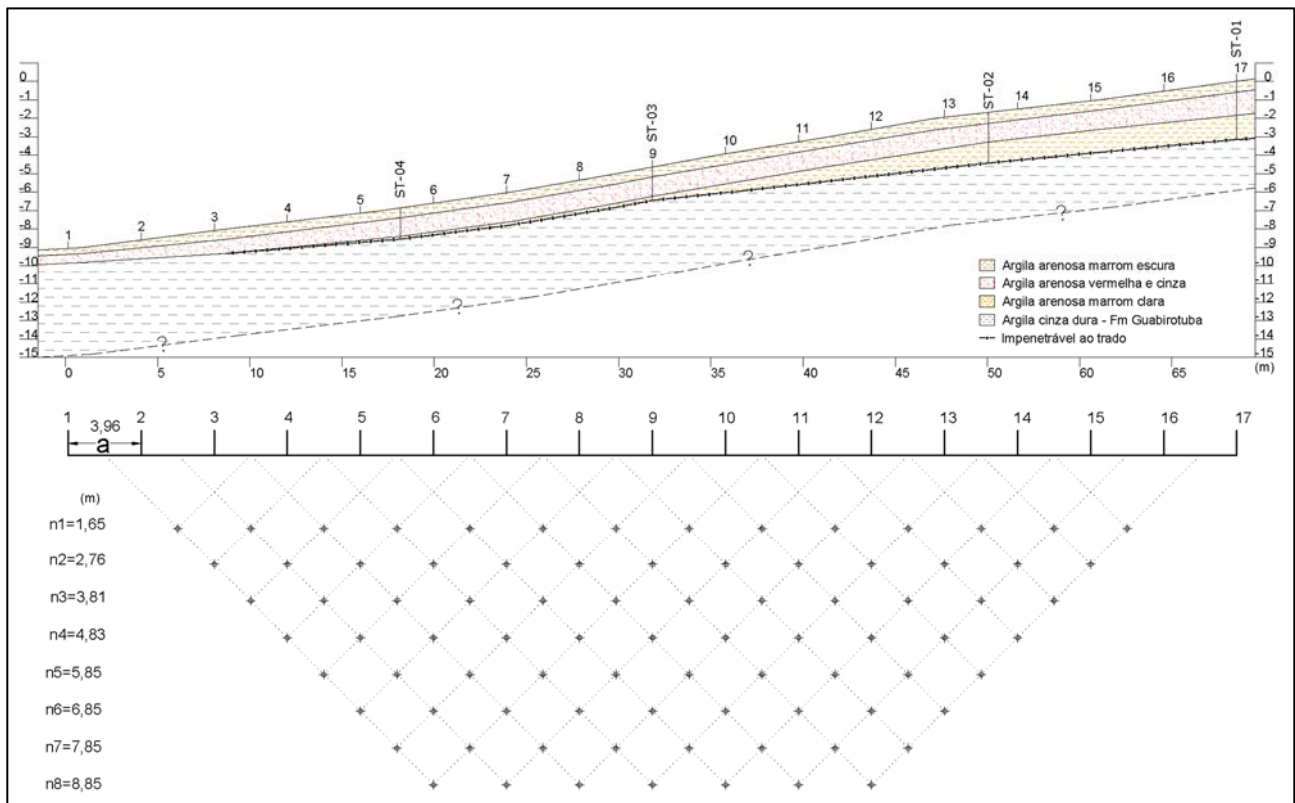


Figura 1. Perfil geotécnico da linha de TRE, e a configuração da pseudoseção para o arranjo dipolo-dipolo com indicação da posição dos eletrodos 1 a 17.

2.2 TRE

A Tomografia de Resistividade Elétrica (TRE) consiste em uma seção de caminhamento elétrico 2D, que apresenta o imageamento em escala de cores a partir dos dados de resistividade elétrica plotados conforme o arranjo de eletrodos utilizado. O arranjo elétrico utilizado foi o dipolo-dipolo, pois é o método que melhor representa variações horizontais na resistividade, além da sua facilidade operacional devido a simetria na disposição dos eletrodos (Thirard et al., 2022; Zeng et al., 2016; Gandolfo e Gallas, 2007). A Linha de TRE foi instalada em um terreno particular no município de Colombo, onde foram fixados 17 eletrodos com espaçamento de 4,00 m (3,96 m em planta), no sentido de mergulho do talvegue. De acordo com Locke (2004), para oito níveis de medições, esta configuração fornece leituras nas profundidades $n_1=1,66$ m, $n_2=2,79$ m, $n_3=3,85$ m, $n_4=4,88$ m, $n_5=5,90$ m, $n_6=6,92$ m, $n_7=7,93$ m e $n_8=8,94$ m (figura 1).

2.2.1 TRE Time-lapse

A metodologia de monitoramento por Eletroresistividade em *time lapse* vem sendo aplicada por diversos autores com o objetivo principal de caracterizar o fluxo hidrodinâmico em taludes e a sua influência na sua estabilidade, em função da resposta elétrica obtida por meio do método de TRE (Bellanova et al., 2018; Whiteley et al., 2023; Dimech et al., 2022; Lapenna et al., 2022; Nielson et al., 2021; Kotikian et al., 2019; Hen-Jones et al., 2017; Wilkinson et al., 2016; Tesfaldet et al., 2019; Uhlemann et al., 2016; Gunn et al., 2015; Chambers et al., 2014). A resposta do método de resistividade elétrica em meios porosos – solos – é condicionada pelo grau de saturação e do tipo de fluido que permeia os vazios (sais dissolvidos, matéria orgânica, viscosidade e temperatura, por exemplo). Assim, este método busca identificar variações do grau de saturação do meio avaliado e, conseqüentemente, avaliar a estabilidade de um talude sujeito a fenômenos de movimento de massa.

Foram realizadas 4 medições em momentos distintos: nos dias 10, 19 e 26 de fevereiro e no dia 21 de março. Os dados coletados são apresentados na forma de resistividade aparente, visto que o objetivo é caracterizar a variação da resistividade ao longo do tempo. Posteriormente, foi definido a pluviosidade diária

local a partir da interpolação pelo inverso da distância de 6 estações pluviométricas mais próximas disponíveis: Alto da Cruz, Atuba, Jardim Atuba, Maria Antonieta, Jardim Santa Monica e Jardim Graciosa (disponível em <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>). Os dados então foram plotados graficamente para comparação e interpretação.

2.2 Sondagens

Com o objetivo de caracterizar o perfil geotécnico do local estudado, foram realizadas 4 sondagens a trado distribuídas ao longo da seção de TRE. A locação dos pontos está indicada na figura 1.a., juntamente com o perfil geotécnico interpretado. Em cada ponto de sondagem foram coletadas 3 amostras (1,0, 2,0, e 3 metros de profundidade) para obtenção dos teores de umidade naturais e comparação com os dados de resistividade aparente obtidos.

3 RESULTADOS

As Tomografias de Resistividade Elétrica Aparente (ohm.m) são apresentadas na figura 2. É nítida a interface entre uma zona superficial com resistividades aparentes maiores que 10 ohm.m e uma camada inferior com resistividades baixas, menores que 10 ohm.m com variações muito pequenas ao longo do tempo. Isso se deve à natureza do material, que é composto pelas argilas sobreadensadas da formação guabirota, de consistência rija a dura, o que confere baixas permeabilidades aliado a índices de vazios relativamente menores aos da camada superficial.

Entre 2 e 4 metros de profundidade, notamos a presença de uma camada de transição, com resistividades menores que 5 ohm.m, que pode ser interpretada como uma zona de fluxo subterrâneo, visto que a água de infiltração encontra uma camada de permeabilidade baixa e tende a escoar na interface entre a região de solo residual mais permeável e a argila cinza rija. Esta interpretação é corroborada pelo fato de a sondagem ST-04 ter interceptado o NA em 1,70 m de profundidade, coincidente com a interface entre as duas camadas neste ponto.

Ainda, o primeiro nível de medição mostra valores maiores que 20, chegando a 50 ohm.m de resistividade aparente na porção elevada da seção, valores coerentes com o perfil stratigráfico que mostra uma camada superficial de solo residual de menor consistência e maior porosidade. Desta forma, a camada superficial é mais suscetível à variações nos teores de umidade, que devem ser identificados pela TRE. As seções mostraram uma variação nos valores obtidos no primeiro nível, chegando a 33 % de aumento de resistividade entre t_0 e $t+9$.

A figura 3 mostra um gráfico com a precipitação diária em mm obtida para o local e a resistividade aparente média por nível de medição em ohm.m. A partir da análise do gráfico, percebemos que o nível 3 apresentou quedas nos valores de resistividade medidos após um período de chuvas intensas, o que demonstra que, de fato, a interface entre a camada superficial e a camada de argila rija representa uma zona de fluxo de água que direciona a água de infiltração. O fato de os níveis 1 e 2 apresentarem aumento dos valores de resistividade após a chuva pode ser entendido como consequência de altas permeabilidades, o que não permite a retenção de fluido, e maior sensibilidade às variações diárias de tempo, como sol e vento, que podem proporcionar a evapotranspiração da umidade nessas zonas.

Os teores de umidade natural também demonstram a diminuição dos índices de vazios com a profundidade, representando menor massa de água em relação a massa de sólidos, enquanto que os níveis superficiais apresentam teores de umidade maiores que 40% (tabela 1). A coleta das amostras foi realizada após um período de chuvas, desta forma, não há parâmetros suficientes para inferir o grau de saturação. Para isso, é necessário realizar novas etapas de investigação com coletas de amostras indeformadas, possibilitando a aferição do índice de vazios e do grau de saturação, para posterior comparação com a resistividade aparente medida.

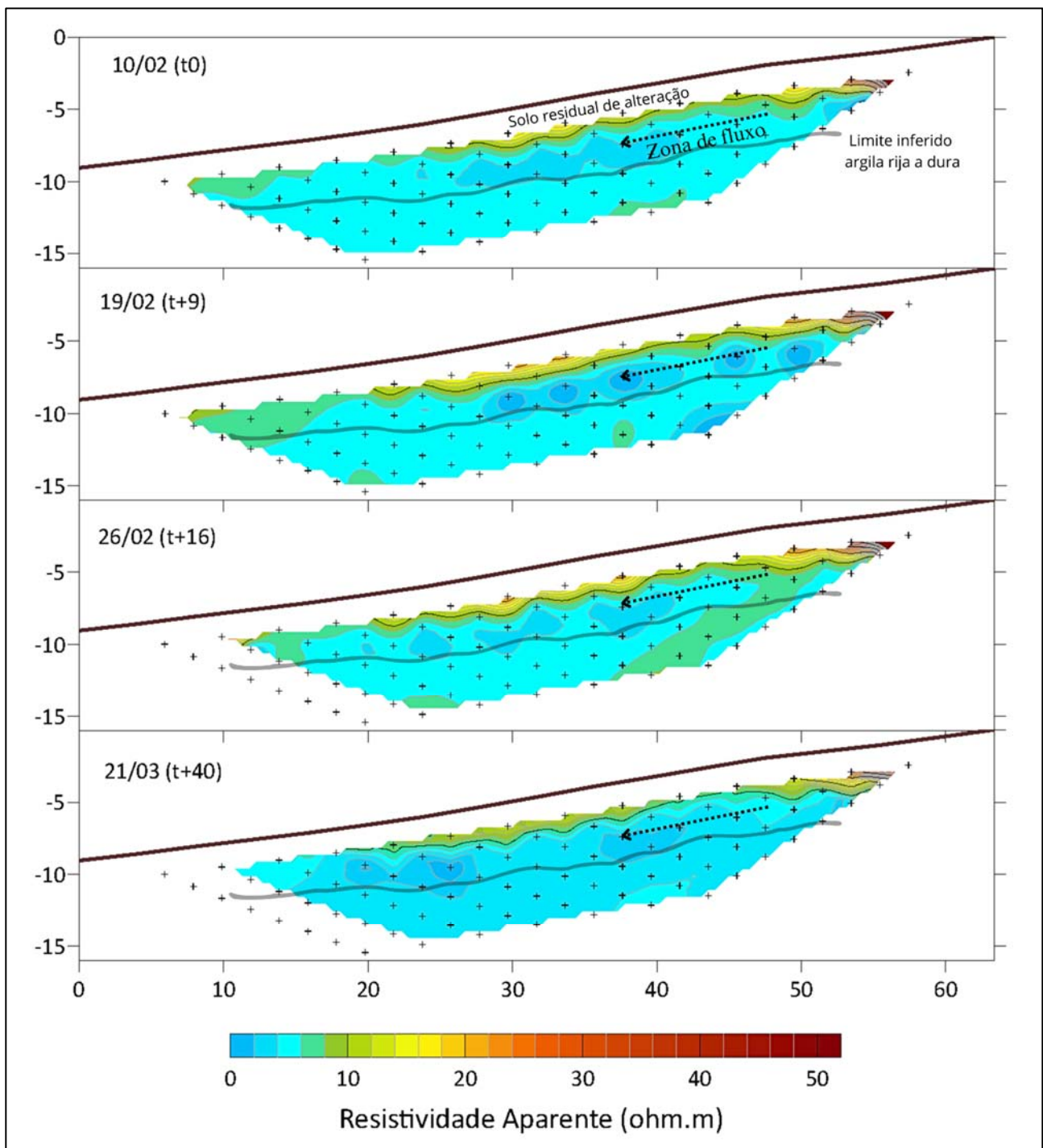


Figura 2. TRE aparente para os quatro levantamentos (t_0 , $t+9$, $t+16$ e $t+40$ dias).

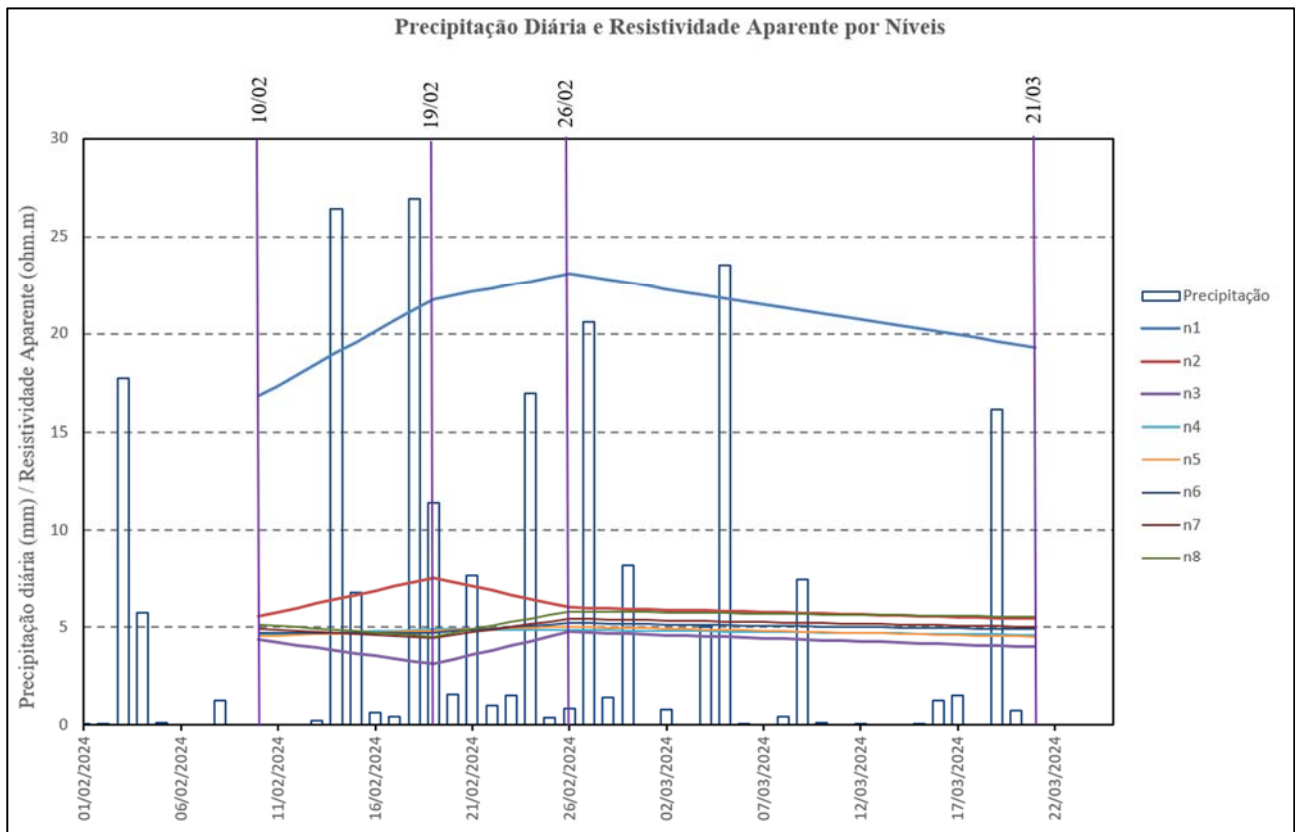


Figura 3. Gráfico de precipitação diária e resistividade aparente média por nível. Nota-se que as leituras t+9 (19/02) apresentaram maiores valores de resistividade para os níveis 1 e 2, mesmo com os maiores índices de pluviosidade, enquanto o nível 3 apresentou queda nos valores médios.

Tabela 1. Teores de Umidade Natural por amostra coletada no dia 01/03.

Ponto (ST)	Profundidade (m)	Umidade Natural (%)
ST-01	0,20	51,4
ST-01	1,00	54,5
ST-01	2,00	39,8
ST-01	3,00	40,8
ST-02	0,20	55,7
ST-02	1,00	56,6
ST-02	2,00	32,5
ST-02	3,00	34,6
ST-03	0,20	64,5
ST-03	1,00	46,3
ST-03	2,00	34,6
ST-04	0,20	43,3
ST-04	1,00	44,3

4 CONCLUSÕES

Os dados apresentados permitem concluir que o método da TRE em *time-lapse* é uma ferramenta capaz de identificar variações na resistividade aparente do solo ao longo do tempo, devido às variações de taxas pluviométricas e da permeabilidade do solo. As camadas superficiais foram as que mais apresentaram variações nas leituras, que podem ser interpretadas como alterações nos teores de umidade e do grau de saturação das camadas, devido à infiltração de água da chuva.

Porém, para aferir o método como ferramenta para o monitoramento geotécnico, devem ser realizadas medições com arranjos ajustados para obter melhor resolução em profundidades mais rasas, com o objetivo de detectar com mais precisão as variações de umidade. Ainda, para melhor compreensão da correlação entre os índices pluviométricos e variações de resistividade, devem ser executadas campanhas com maior frequência de medição, buscando identificar as variações de resistividade logo após os eventos atmosféricos.

Por fim, as seções de TRE puderam caracterizar a composição estratigráfica do local, de acordo com as sondagens e o perfil elaborado, demonstrando com clareza uma camada espessa de resistividades aparentes baixas (argila cinza rija) e uma camada superficial de solo residual de alteração, com resistividades mais elevadas, em função de sua maior porosidade e grau de lixiviação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LPGA – Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, da UFPR, pelo fornecimento do resistivímetro e pelo treinamento para sua utilização; á I-Geo Engenharia e Geotecnia Ltda. pela realização das sondagens a trado e ensaios de umidade natural; ao PPGEC-UFPR pela oportunidade de realizar esta pesquisa e a CAPES pela concessão de bolsa estudantil para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bellanova, J., Calamita, G., Giocoli, A., Luongo, R., Macchiato, M., Perrone, A., Uhlemann, S., & Piscitelli, S. (2018). Electrical resistivity imaging for the characterization of the Montaguto landslide (southern Italy). *Engineering Geology*, 243, 272–281.
- Calamita, G., Gallipoli, M. R., Gueguen, E., Sinisi, R., Summa, V., Vignola, L., Stabile, T. A., Bellanova, J., Piscitelli, S., & Perrone, A. (2023). Integrated geophysical and geological surveys reveal new details of the large Montescaglioso (southern Italy) landslide of December 2013. *Engineering Geology*, 313.
- Di Maio, R., De Paola, C., Forte, G., Piegari, E., Pirone, M., Santo, A., & Urciuoli, G. (2020). An integrated geological, geotechnical and geophysical approach to identify predisposing factors for flowslide occurrence. *Engineering Geology*, 267.
- Dimech, A., Cheng, L. Z., Chouteau, M., Chambers, J., Uhlemann, S., Wilkinson, P., Meldrum, P., Mary, B., Fabien-Ouellet, G., & Isabelle, A. (2022). A Review on Applications of Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Over the Last 30 Years: Perspectives for Mining Waste Monitoring. In *Surveys in Geophysics*. Springer Science and Business Media B.V.
- FETRANSPAR (2023). Problemas em rodovias geram prejuízos de R\$ 100 milhões ao transporte de cargas. Disponível em <https://www.fetranspar.org.br/noticias/problemas-em-rodovias-geram-prejuizo-de-r-100-milhoes-ao-transporte-de-cargas/>. Publicado em 15/03/2023.
- Gunn, D. A., Chambers, J. E., Uhlemann, S., Wilkinson, P. B., Meldrum, P. I., Dijkstra, T. A., Haslam, E., Kirkham, M., Wragg, J., Holyoake, S., Hughes, P. N., Hen-Jones, R., & Glendinning, S. (2015). Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography. *Construction and Building Materials*, 92, 82–94.
- Hen-Jones, R. M., Hughes, P. N., Stirling, R. A., Glendinning, S., Chambers, J. E., Gunn, D. A., & Cui, Y. J. (2017). Seasonal effects on geophysical–geotechnical relationships and their implications for electrical resistivity tomography monitoring of slopes. *Acta Geotechnica*, 12(5), 1159–1173.
- Kotikian, M., Parsekian, A. D., Paige, G., & Carey, A. (2019). Observing Heterogeneous Unsaturated Flow at the Hillslope Scale Using Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 1–16.

- Lapenna, V., & Perrone, A. (2022). Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography (TL-ERT) for Landslide Monitoring: Recent Advances and Future Directions. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 3). MDPI.
- Lebourg, T., Hernandez, M., Zerathe, S., El Bedoui, S., Jomard, H., & Fresia, B. (2010). Landslides triggered factors analysed by time lapse electrical survey and multidimensional statistical approach. *Engineering Geology*, 114(3–4), 238–250.
- Loke, M. H. (n.d.). *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. www.geoelectrical.com
- Macedo, E. S. de, Sandre, L. H. (2022). Mortes por deslizamento no Brasil: 1988 a 2022. Em *RBGEA Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental* (Vol. 12, Issue 01, pp. 110–117).
- Morales Kormann, A. C. (2002). *Comportamento geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório*. Tese de Doutorado. USP.
- Nielson, T., Bradford, J., Pierce, J., & Seyfried, M. (2021). Soil structure and soil moisture dynamics inferred from time-lapse electrical resistivity tomography. *Catena*, 207.
- Perrone, A., Lapenna, V., & Piscitelli, S. (2014). Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 135, pp. 65–82). Elsevier.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: A review. In *Soil and Tillage Research* (Vol. 83, Issue 2, pp. 173–193).
- Tesfaldet, Y. T., & Puttiwongrak, A. (2019). Seasonal groundwater recharge characterization using time-lapse electrical resistivity tomography in the thepkasattri watershed on Phuket Island, Thailand. *Hydrology*, 6(2).
- Uhlemann, S., Chambers, J., Wilkinson, P., Maurer, H., Merritt, A., Meldrum, P., Kuras, O., Gunn, D., Smith, A., & Dijkstra, T. (2017). Four-dimensional imaging of moisture dynamics during landslide reactivation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(1), 398–418.
- Whiteley, J., Inauen, C., Wilkinson, P., Meldrum, P., Swift, R., Kuras, O., & Chambers, J. (2023). Assessing the risk of slope failure to highway infrastructure using automated time-lapse electrical resistivity tomography monitoring. *Transportation Geotechnics*, 43.
- Whiteley, J. S., Watlet, A., Uhlemann, S., Wilkinson, P., Boyd, J. P., Jordan, C., Kendall, J. M., & Chambers, J. E. (2021). Rapid characterisation of landslide heterogeneity using unsupervised classification of electrical resistivity and seismic refraction surveys. *Engineering Geology*, 290.
- Wilkinson, P., Chambers, J., Uhlemann, S., Meldrum, P., Smith, A., Dixon, N., & Loke, M. H. (2016). Reconstruction of landslide movements by inversion of 4-D electrical resistivity tomography monitoring data. *Geophysical Research Letters*, 43(3), 1166–1174.