

## Estudo da instabilidade de talude em Cachoeira do Brumado, Mariana/MG por meio de método de eletrorresistividade

Vinícius Eleutério Rodrigues

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, [vinicius.eleuterio@aluno.ufop.edu.br](mailto:vinicius.eleuterio@aluno.ufop.edu.br)

Júlia Alves de Souza

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, [julia.souza1@aluno.ufop.edu.br](mailto:julia.souza1@aluno.ufop.edu.br)

Tálita Nola

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, [talitanola@ufop.edu.br](mailto:talitanola@ufop.edu.br)

Luís de Almeida Prado Bacellar

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, [bacellar@ufop.edu.br](mailto:bacellar@ufop.edu.br)

**RESUMO:** O presente trabalho busca estudar, caracterizar e entender os processos geotécnicos causadores da instabilidade de um talude no centro do distrito de Cachoeira do Brumado (Mariana/MG). O local se caracteriza por uma área urbana de aproximadamente 2 hectares formada por um anfiteatro escarpado seguindo por uma encosta ondulada a moderadamente ondulada que se estende na direção do rio principal. Há décadas essa área passa por movimentações que geram gradativamente: trincas nos muros, nas paredes das residências e no pavimento asfáltico da rua; postes e cercas inclinadas; e, embarrigamento dos troncos das árvores – somando prejuízos materiais e econômicos tanto para os habitantes, dificultando a gestão pública do município. Após o reconhecimento de campo e as análises dos resultados observou-se que se trata de um rastejo que movimenta lentamente um material coluvionar em contato direto com o nível d'água que se encontra a aproximadamente 1m de profundidade e, em alguns locais emerge formando pequenas poças d'água. O perfil estratigráfico se mostra como uma camada argila silto-arenosa de cor marrom com aproximadamente 2,5 m de espessura, seguida pelo solo residual que se apresenta como silte argilo-arenoso ou silte arenoso, de cor rosa e cinza, por vezes com intercalações amarronzadas até encontrar o impenetrável a percussão. O ensaio de eletrorresistividade por caminhamento elétrico demonstrou a presença de um nível d'água suspenso com profundidade máxima de 5,0 m.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rastejo, Eletrorresistividade, Sondagem à Percussão.

**ABSTRACT:** This article presents the study and characterization of the geotechnical processes that cause the instability of a slope in the center of the district of Cachoeira do Brumado (Mariana/MG). The site is characterized by an urban area of approximately 2.0 hectares formed by a steep amphitheater following an undulating to moderately undulating slope that extends in the direction of the main river. For decades, this area has experienced movements gradually resulting in: cracks in the walls, in the walls of residences and in the asphalt pavement of the street; leaning posts and fences; and, bending the tree trunks – adding material and economic losses to the inhabitants, making municipal management more difficult. After field reconnaissance and analysis of the results, it was observed that it is a creep that slowly moves colluvial material in direct contact with the groundwater level, which is approximately 1.0 m deep and, in some places, it emerges forming small puddles of water. The stratigraphic profile reveals a layer of brown-colored silty-sandy clay approximately 2.5 meters thick, followed by residual soil appearing as sandy-clay silt or sandy silt, colored pink and gray, occasionally interspersed with brownish hues until reaching impenetrable material. The electrical resistivity method demonstrated the presence of water close to the surface and, additionally, showed the trapping of moisture at depths exceeding 5.0 m.

**KEYWORDS:** creep, Electric Resistivity, Standard Penetration Test

## 1 INTRODUÇÃO

Movimentos de massa gravitacionais são mundialmente conhecidos pelo seu grande poder de destruição e, têm se tornado cada vez mais comuns em meios urbanos. Isso porque as cidades passam por uma crescente intensificação da ocupação urbana devido ao aumento populacional e, a falta de planejamento e ordenamento territorial contribuem diretamente para a determinação do risco geológico-geotécnico (Barbieri et al, 2022).

De acordo com o Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2024), mais de 582 mil pessoas vivem em áreas de risco geológico em Minas Gerais. Ademais, os movimentos de massa do tipo rastejo – que são caracterizados por serem lentos, com deslocamentos sazonais e de geometria indefinida (Guidicini e Nieble, 1984), geram consequências graduais ao longo do tempo, o que provoca uma falsa impressão de segurança. Segundo Gonçalves (2014), estudar este movimento é importante para compreender sua dinâmica, uma vez que os rastejos, de modo geral, podem evoluir para processos erosivos ou movimentos de massa mais complexos.

Para entender os princípios que desencadeiam os rastejos, muitos autores buscam realizar uma caracterização adequada do movimento e apontam que: a presença de água no subsolo tem relação direta com a movimentação, tornando o principal agente deflagrador (Ito, Godois e Futai, 2012; Gonçalves, 2014; Issa, 2019; Silva, 2019). Conjuntamente, alguns autores utilizam investigações geotécnicas, como a sondagem à percussão e o método de eletrorresistividade, a fim de mapear os agentes causadores de instabilidade das encostas (Perrone, 2014; Gonçalves, 2016; Morais, 2019; Xiao et al 2020; Gonçalves, 2021).

A partir do exposto, o propósito deste trabalho é apresentar os estudos realizados para avaliar os princípios geotécnicos causadores do movimento de massa do tipo rastejo que acontece no centro do distrito de Cachoeira do Brumado (Mariana/MG). Para isso, são expostos os resultados das investigações geotécnicas por meio de sondagem à percussão e do perfil de eletrorresistividade realizados na área de estudo.

## 2 A INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA E OS MOVIMENTOS DE MASSA

### 2.1 Movimentos de massas

Movimentos de massa podem ser classificados como processos superficiais que deslocam um determinado volume de solo, rocha e/ou material, caracterizando-se como um dos maiores processos de alteração e de desenvolvimento de encostas (Guidicini e Nieble, 1984; Highland e Bobrowsky, 2008). Seu deslocamento possui sentido para baixo e para fora da encosta, sob influência direta da gravidade (Varnes, 1978). Os agentes deflagradores dos movimentos de massa podem ser: características climáticas, geomorfológicas, o material que compõe o substrato, o regime de águas de superfície e subsuperfície e, as características de uso e ocupação dos solo (Augusto Filho e Virgili, 1998). São processos atuantes na evolução de paisagens, mas que, ao mesmo tempo, podem causar perdas sociais e econômicas significativas (Selby, 1993).

No Brasil, as classificações mais utilizadas são: Guidicini e Nieble (1984), IPT (1991) e Augusto Filho (1992). Assim, tem-se os movimentos de massa classificados em: escorregamentos – rotacionais e translacionais, quedas, tombamentos, corridas e rastejos.

Guidicini e Nieble (1984) e Highland e Bobrowsky (2008) descrevem o rastejo como um movimento sazonal, lento e contínuo de material de encostas com limites, via de regra, indefinidos. Podem envolver grandes massas de solo sem que haja, na área atingida, diferenciação entre o material em movimento e o material estacionário. Essa movimentação é provocada pela ação da gravidade com influência principal do teor de água no solo.

O rastejo se evidencia, em superfície, por mudança na verticalidade de postes e cercas, por árvores inclinadas e com troncos curvados, por trincas e rupturas em elementos rígidos, como muros e paredes. Esse movimento pode ainda ter comportamento complexo, com velocidade não uniforme, aos pulsos, ou posteriormente se transformar em escorregamentos ou processos erosivos (Guidicini e Nieble, 1984).

## 2.2 Investigações geotécnicas

Os estudos de caracterização geológica-geotécnica para análise da estabilidade de encostas utilizam ferramentas de investigações que buscam conhecer e entender o comportamento do material do subsolo e os seus mecanismos de instabilidade. Os principais métodos de investigação geotécnica incluem sensoriamento remoto, mapeamento geológico, ensaios geofísicos e sondagens mecânicas. No entanto, a utilização desses métodos individualmente tem uma capacidade limitada de caracterizar o meio físico, logo a utilização de dois ou mais métodos implicam em melhores resultados (Souza et al. 1998). Desta forma, métodos mecânicos e geofísicos são comumente utilizados em conjunto para ampliar e otimizar a investigação geotécnica (Gonçalves, 2019).

A sondagem à percussão (SPT) é um tipo de investigação geotécnica direta que possui três objetivos principais, a saber: a obtenção do índice de resistência do solo; a identificação do nível d'água e a estratigrafia do substrato terroso (Oliveira e Monticeli, 2018). A eletrorresistividade é um método de investigação geotécnica indireta por meio da geofísica e baseia-se na determinação da resistividade elétrica dos materiais (Borges, 2002). De acordo com Souza et al. (1998), os fatores mais importantes que condicionam a resistividade elétrica do meio são: a textura, a presença de argilas, a porosidade a umidade e salinidade do solo (Telford et al, 1976).

## 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Cachoeira do Brumado é um distrito da cidade de Mariana, no estado de Minas Gerais. Localiza-se cerca de 26 km do distrito sede de Mariana e a aproximadamente 140 km da capital mineira, Belo Horizonte.

A área de estudo situa-se na área urbana do distrito, próximo à Rua Tombadouro na altura do número 41. A área apresenta diversas evidências da movimentação do tipo rastejo (Figura 1), as quais destacam-se trincas diagonais nas paredes das residências, postes e cercas inclinados, abatimento das vias do entorno e deformação dos muros de contenção. Todas essas características foram evoluindo gradativamente e alguns moradores locais relatam que o movimento existe há algumas décadas, chegando a ter que abandonar suas residências devido ao risco de ruptura da encosta.

Geologicamente é constatada na região a presença de duas litologias diferentes (Figura 2): Metaultramáficas (esteatitos) e Gnaisses Granodioríticos (CPRM, 2020). As rochas metaultramáficas, no local, estão topograficamente acima das rochas gnáissicas e tem por característica elevada resistência mecânica quando pouco intemperizadas, entretanto são altamente suscetíveis ao intemperismo, e têm como produto de sua alteração, solos argilosos e bem coesos (Reis e Parizzi, 2018). Além disso, as principais rochas metaultramáficas são os esteatitos, chamadas localmente de pedra-sabão, muito explorada na região e matéria prima dos artesanatos fabricados no distrito (Jordt-Evangelista e Silva, 2005).

Por estar inserida na área urbana do distrito, inevitavelmente a área de estudo está propícia à ocupação urbana, como a construção de residências e obras de infraestrutura. Ao todo, foram contabilizados 6 (seis) imóveis no local, sendo que em pelo menos 3 (três) deles não há moradores devido ao risco geotécnico associado e 1 (um) é utilizado como loja. Isso demonstra a percepção do risco geotécnico pelos moradores que estão cientes de que a região não é apta a construção, e infelizmente os que ainda ocupam o local não possuem outra opção de moradia.



Figura 1 – Indícios do rastejo: A) abatimento da via; B) deformação do muro de contenção; C) poste inclinado; D) trincas nas paredes.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da pesquisa se iniciou pelo levantamento de dados prévios da região seguido pelas visitas de campo para identificação no movimento e o registro fotográfico dos indícios da movimentação. Durante as visitas de campo também foram realizados os ensaios geofísicos por meio do método de eletrorresistividade a fim de analisar o subsolo.

Os boletins das sondagens à percussão (SPT) foram disponibilizados pela Prefeitura de Mariana. Foram disponibilizados na totalidade 18 boletins de sondagem, sendo utilizados neste artigo dois furos (SP-04 e SP-09) executados pela empresa CNM ENGENHARIA LTDA nos dias 26/02/2022 e 03/03/2022 (período chuvoso).

A investigação por eletrorresistividade foi realizada no dia 17/07/2023 (período de seca) utilizando o arranjo de medição Caminhamento Elétrico (CE) apresentado na Figura 3, com os eletrodos posicionados de acordo com o arranjo Dipolo-Dipolo. Ao todo foram 5 (cinco) caminhamentos realizados longitudinalmente e transversalmente ao sentido de movimentação do rastejo. O aparelho utilizado para a realização do ensaio foi o Resistivímetro Lippmann D-94571.

A Figura 2 exibe a localização de 2 (dois) dos 5 (cinco) CEs realizados: seção 1 (longitudinal ao sentido do movimento) e seção 5 (perpendicular ao sentido do movimento). Os parâmetros de espaçamento entre os eletrodos (a), os níveis de investigação (n) e o comprimento do caminhamento, para as duas seções, foram respectivamente 2,5 m, 1 – 5, e 47,5 m.

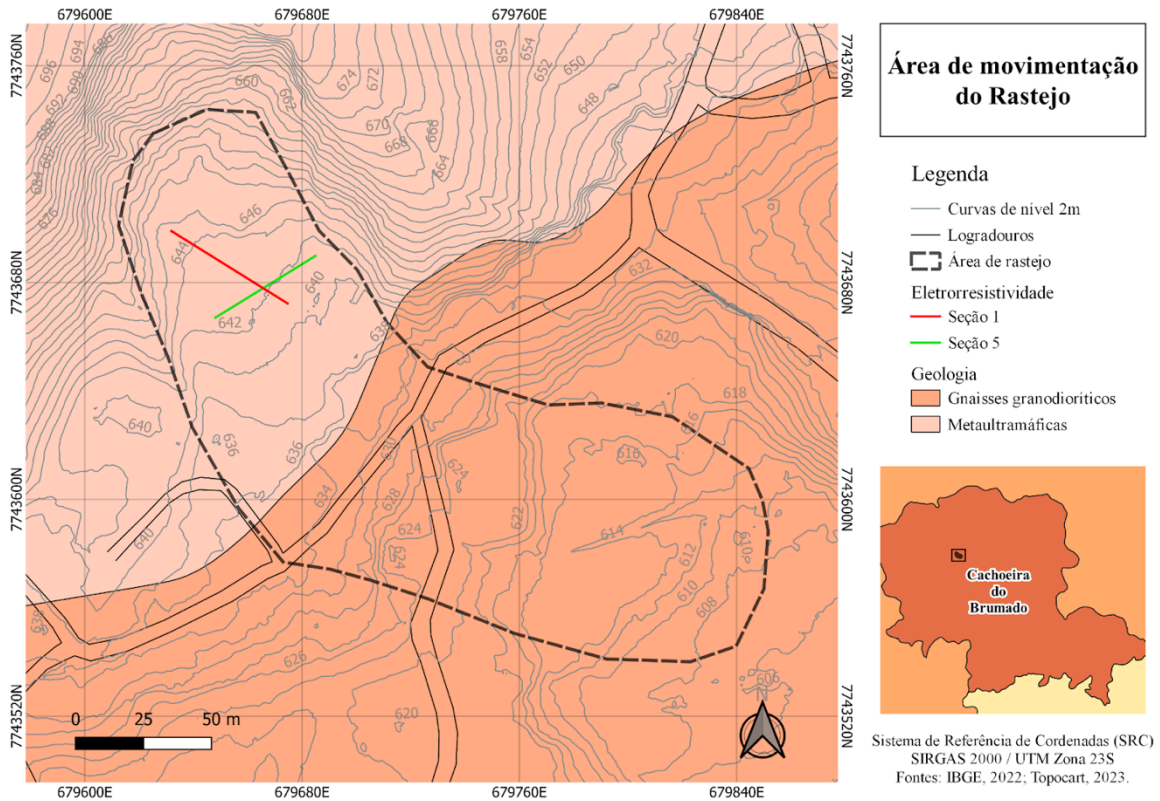


Figura 2 - Área de estudo apresentando a delimitação do movimento de rastejo e a localização dos CEs.



Figura 3 – Investigações geotécnicas: A) execução de sondagem à percussão SPT (SP-04); B) execução do CE (seção 1).

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Sondagens à percussão (SPT)

Com os dados topográficos e os boletins de sondagem SPT, traçou-se um perfil topográfico longitudinal por onde foram feitas as sondagens SP-04 e SP-09 e, elaborou-se o perfil estratigráfico do solo (Figura 4). Os níveis d'água foram encontrados a 1,06 m e a 2,70 m de profundidade, respectivamente nas sondagens SP-04 e SP-09. A estratigrafia do subsolo apresenta uma intercalação de camadas compostas por argila silto-arenosa, silte argilo-arenoso e silte arenoso até encontrar o residual jovem da rocha metaultramáfica a aproximadamente 4,5 m de profundidade na sondagem SP-04. A camada de argila silto-arenosa apresenta  $N_{spt}$  igual a 3, sendo plástica e mole. A camada de silte argilo-arenoso apresenta  $N_{spt}$  entre 6 e 11, aumentando com a profundidade devido ao efeito do confinamento, sendo plástica de mole e rijo. O  $N_{spt}$  da próxima camada de silte arenoso varia entre 6 e 15, sendo não plástico de pouco a muito compacto. E a camada de silte arenoso, representante do residual jovem, possui uma maior variabilidade do índice de resistência entre 13 e 40, sem apresentar uma tendência de aumentar com a profundidade, isto é, intercalando valores altos e baixos de  $N_{spt}$ .

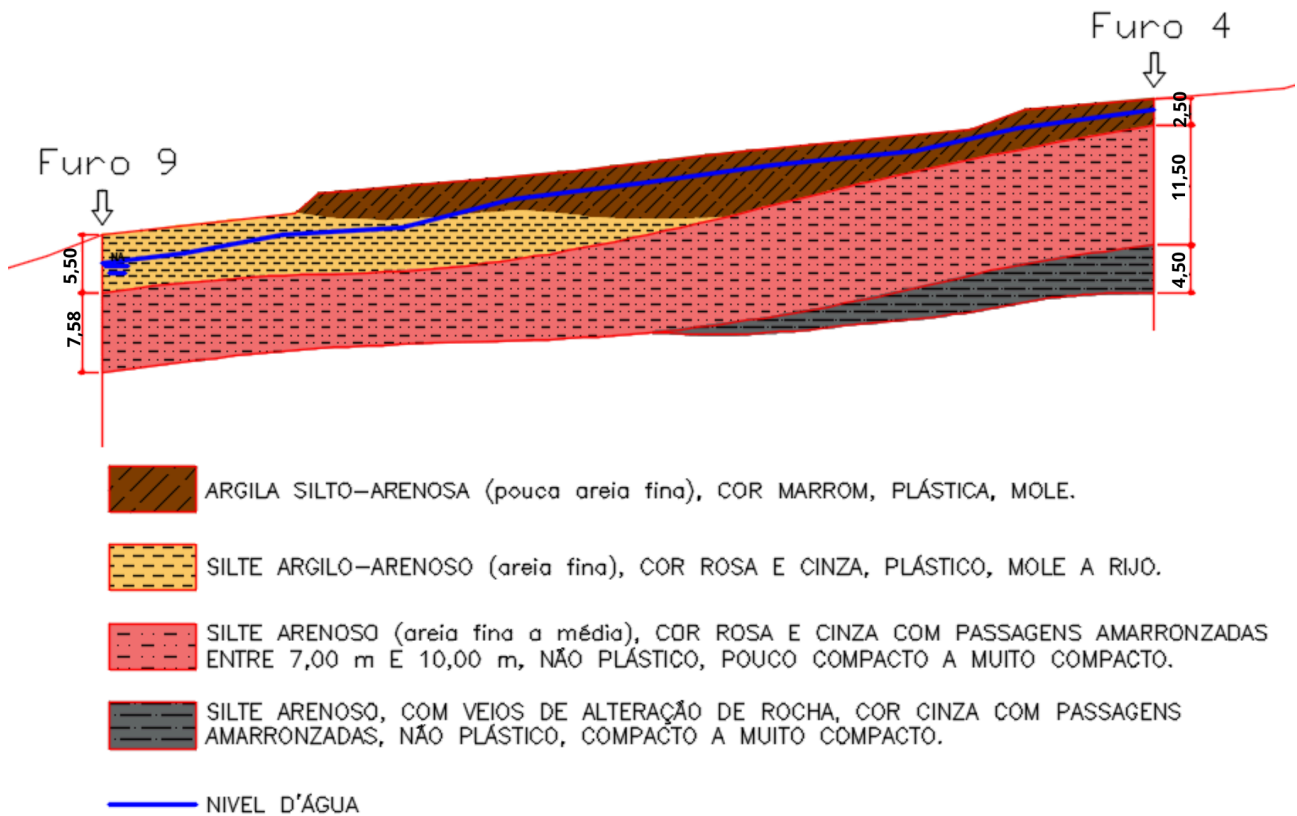


Figura 4 – Perfil estratigráfico de solo da área de estudo.

## 6.2 Método de Eletrorresistividade

As seções do caminhamento elétrico permitiram a verificação da resistividade em profundidades de até 12 m. A seção 1 (Figura 5) foi realizada no sentido longitudinal ao movimento. É possível verificar uma faixa superficial de aproximadamente 1 m de espessura que apresenta uma maior variação nos valores de resistividade. Abaixo desta camada é observada uma região de baixa resistividade, possivelmente associada a camada de solo saturada em água. Esta camada é contínua por toda a seção e varia de 2 a quase 4 m de espessura. Possivelmente, nesta região existe uma zona de percolação de água subsuperficial. Abaixo desta

camada os valores de resistividade voltam a aumentar. Destaca-se uma região da seção (topograficamente mais alta) onde observa-se a presença da água muito próxima à superfície.

Na seção 5 (Figura 6) o caminhamento elétrico foi feito transversalmente ao movimento. Diferentemente da seção 1, observa-se que uma concentração da região de baixa resistividade no centro do perfil estudado, entre a posição 17,0 m e 26,0 m do comprimento do caminhamento. Esta região mostra-se a 2,0 m de profundidade, podendo ser um fluxo concentrado de água subsuperficial, semelhante a um curso d'água subterrâneo. Lateralmente, em ambos os lados, a resistividade aumenta, chegando a valores muito altos, próximos a 1270 ohm.m.

Considerando que a região de baixa resistividade está associada ao nível d'água subsuperficial, observa-se que durante o período de seca o nível d'água encontra-se raso, a aproximadamente 2 m de profundidade. E no período de chuva esse nível fica ainda mais raso, a 1 m de profundidade. Em ambos os períodos é possível ver em alguns locais poças de água aflorando na superfície.

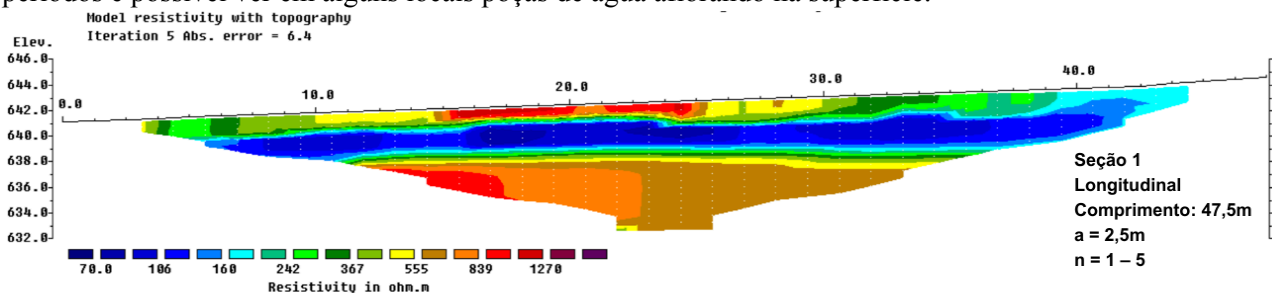


Figura 5 - Seção de resistência elétrica 1

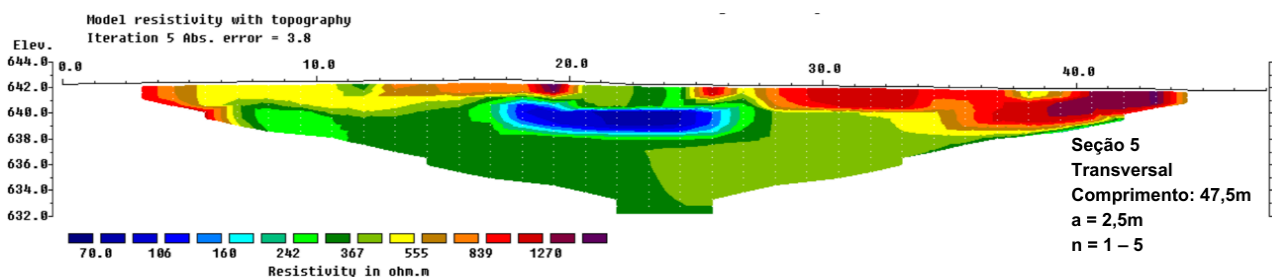


Figura 6 - Seção de resistência elétrica 5

Os resultados de eletrorresistividade quando associados ao perfil estratigráfico mostram a presença de água no solo, principalmente as camadas de silte argilo-arenoso e silte arenoso. Não foi possível encontrar uma inferência direta da base da zona saturada com o limite/contacto de nenhuma das camadas. Entretanto, pode-se sugerir que este limite esteja próximo do contato superior do residual jovem (camada de silte arenoso da cor cinza (Figura 4).

Após análise dos resultados obtidos, sugere-se a água subsuperficial como agente deflagrador movimentação, visto que ela está fortemente presente, mesmo com os levantamentos realizados fora das épocas chuvosas (julho/2023) e, existe um indicativo de fluxo concentrado no sentido do movimento do rastejo.

## 7 CONCLUSÃO

O movimento de massa gravitacional que ocorre no distrito de Cachoeira do Brumado impõe desafios e preocupações significativas para o desenvolvimento e o bem-estar da comunidade local. Esse fenômeno foi classificado como um rastejo após a verificação dos indícios de movimentação que se apresentam em todas as construções civis da área estudada. Esse fenômeno é resultado de uma interação complexa de vários fatores que influenciam sua movimentação associados principalmente à presença de água subsuperficial. O perfil estratigráfico apresentou um solo de baixo  $N_{spt}$  até aproximadamente 10 m de profundidade, sendo

uma mistura entre solos argilosos e siltosos com presença de areia. Os resultados de eletrorresistividade sugerem uma redução da resistividade que pode ser associada à presença de água subsuperficial e demonstra existir um do fluxo subterrâneo concentrado. Recomenda-se realizar o monitoramento da movimentação, tanto em termos de deslocamento quanto na variação do nível d'água, a fim de fornecer dados mais robustos para a compreensão e gestão desse fenômeno dinâmico.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto pelo suporte acadêmico e científico, à FAPEMIG - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Projeto APQ 1613-22) ao CNPq (processo 313840/2021-0) e ao REAGEO – pelo auxílio financeiro e à Prefeitura Municipal de Mariana pela disponibilização dos dados.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUGUSTO FILHO, O. (1992). Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela, SP. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – SP, p.162.

BARBIERI, A. F., VIANA, R. D. M., SOARES, V. C. D. O., & SCHNEIDER, R. A. (2022). Contribuições teóricas para uma demografia dos desastres no Brasil. *Revista Brasileira De Estudos De População*, 39, 1–29.

BORGES, W. R. Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade. 2002. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; Mais de 582 mil pessoas vivem em áreas de risco geológico em Minas Gerais, 2024. Disponível em: <<https://www.sgb.gov.br/publique/Noticias/Mais-de-582-mil-pessoas-vivem-em-areas-de-risco-geologico-e-m-Minas-Gerais-8517.html>>. Acesso em: 08 fev. 2024.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; Mapa geológico e de recursos minerais integrado do Quadrilátero Ferrífero - Subárea Central, 2020. Disponível em: <<https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20490>>. Acesso em: ago.2023.

GONÇALVES, Y. D. C. Estudo de movimento de massa do tipo rastejo (creeping) no Morro do Benjamin, em São José-sc. 2014. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina.

GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo: Edgard Blücher - Ed. da Universidade de São Paulo. 1984.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. O Manual de Deslizamento – Um Guia para a Compreensão de Deslizamento. Reston, Virgínia, Circular do Serviço Geológico dos EUA, 2008.

IPT/INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1991). Ocupação de encostas. In: CUNHA, M.A. (coordenador). São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, p.91.

ISSA, M. A. A. Análise das manifestações patológicas em unidade escolar: o caso da Escola Municipal Anísio Teixeira. Engenharia Civil-Pedra Branca, 2019.

ITO, W. H.; GODOIS, J. V. S.; FUTAI, M. M. Influência do nível d'água no movimento de uma encosta em rastejo na zona norte da cidade de São Paulo. 2012.



JORDT-EVANGELISTA, H.; SILVA, M. E. da. Rochas metaultramáficas de Lamim, sul do Quadrilátero Ferrífero, MG: contribuição ao conhecimento do protólito da pedra-sabão. Rem: 58(1), 11–20, 2005.

OLIVEIRA, A. M. S.; MONTICELI, J. J. (Eds.) Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo: ABGE, 2018. v. 2, p. 479, 2018.

PERRONE, A.; LAPENNA, V.; PISCITELLI, S. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review. Earth-Science Reviews, v. 135, p. 65-82, 2014.

REIS JR, W. D.; PARIZZI, M. G. Caracterização das unidades geotécnicas da porção leste da região metropolitana de Belo Horizonte/MG. Geonomos, 2018.

SELBY, M. J. Hillslope Materials. Oxford University Press, 451 p., 1993.

SILVA, R. S. R. Retroanálise de um deslizamento de talude ocorrido no morro da Praia Mole/SC-406. UFSC, Florianópolis, 2019.

SOUZA, L. A. P.; SILVA, R. F.; IYOMASA, W. S. Métodos de Investigação In: Geologia de Engenharia. Eds OLIVEIRA, A.M.S e BRITO, S.N.A São Paulo, ABGE, 1998 p.163- 196.

TELFORD, W.M., GELDART, L.P. and KEYS, D.A. (1976) Applied Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, 860 p.

VARNES, D. J. Slope movement types and process. Landslides - analysis and control. Transportation Research Board, Special Report 176, p.11-13, 1978.