

MODELAGEM GEOELÉTRICA PARA MELHORAR O MAPEAMENTO ESTRUTURAL DE MACIÇOS ROCHOSOS A PARTIR DE SIMULAÇÃO LABORATORIAL

Luiz Henrique Cardoso ¹; Victor Coelho Pereira ²; Luis de Almeida Prado Bacellar ³; Senta Wittig ⁴

Resumo – Caracterizar fraturas geológicas é altamente relevante para solucionar problemas hidrogeotécnicos. O método de Eletrorresistividade tem sido eficiente na caracterização de fraturas e nesta pesquisa avaliou-se a otimização de sua aplicação em maciços rochosos. Um modelo físico laboratorial permitiu simular um maciço com dois padrões de fraturamento subverticais orientados nas direções NS e N60°E. O modelo consistiu em placas de mármore enterradas em areia saturada dentro de um tanque de acrílico, para simulação de maciço coberto por camada de solo saturado. Os contatos entre as placas representaram as fraturas e objetivou-se realizar modelagens com os arranjos elétricos Dipolo-Dipolo e Gradiente, via caminhamento elétrico, elegendo o melhor para mapeá-las. Com as condições internas e de contorno conhecidas, os dois parâmetros avaliados foram a profundidade teórica de alcance e a respectiva resolução e nível de detalhe dos mapas em planta de resistividade elétrica aparente. O Gradiente apresentou a melhor resolução de anomalias e em profundidade relativamente maior, mapeando, com considerável detalhe, as fraturas da área levantada. Acredita-se que estes resultados sejam de alta relevância para a caracterização de fraturas em geotecnia e até podem servir de subsídio para prospecção de água em aquíferos fraturados.

Abstract – Characterizing geological fractures is highly relevant for solving hydro geotechnical problems. The Electrical Resistivity method has been efficient in characterizing fractures and this research evaluates the optimization of its application in rock mass. Through a physical laboratory model, a rock mass with two vertical fracture patterns oriented in the NS and N60°E directions has been simulated. The model consisted of marble plates buried in saturated sand inside an acrylic tank, for simulating a rock mass covered by a layer of saturated soil. The contacts between the plates represented the fractures and the objective has been to carry out modeling with the electrical arrays, Dipole-Dipole and Gradient, by electrical profiling, choosing the best array to map them. With the known internal and boundary conditions, the two adopted parameters were the theoretical depth and the respective resolution and detail level of the anomalies in horizontal slices of apparent electrical resistivity. The Gradient array presented the best resolution of anomalies and in relatively greater depth, mapping the fractures of the survey area, with considerable detail. It is believed that these results are highly relevant for the characterization of fractures in geotechnics and to subsidy prospecting water in fractured aquifers.

Palavras-Chave – Propriedades elétricas; fraturas; maciço rochoso saturado; hidrogeofísica; análise espacial.

¹ Eng. Geól, MSc, Universidade Federal de Ouro Preto, (31) 9943-26565, luiz.cardoso@ufop.edu.br

² Doutorando USP, victorcperreira@outlook.com

³ Geól., Dr, Universidade Federal de Ouro Preto, (31) 9914-55360, bacellar@ufop.edu.br

⁴ Estudante de geologia, Johannes Gutenberg Universitat, swittig95@t-online.de

1. INTRODUÇÃO

Em geotecnia, caracterizar fraturas geológicas é muito importante. Contudo, perfis espessos de intemperismo, normalmente, impossibilitam a caracterização de campo. Daí, torna-se necessária a aplicação de métodos de investigação indireta, que incorre em custos mais elevados, e.g., sondagem. Mesmo assim, há muitas dúvidas no conhecimento do caminho preferencial da água e das regiões onde há maior concentração de água em problemas geotécnicos em estruturas naturais ou construídas, e.g., barragens, taludes, túneis e obras lineares. Portanto, a aplicação de geofísica é a alternativa, geralmente, mais rápida em aquisição de dados, menos invasiva e menos onerosa.

Inúmeras pesquisas têm abordado o avanço da geofísica na engenharia geotécnica (e.g. Pellerin, 2002; Cardoso et al., 2018; Owusu-Nimo & Boadu, 2020) e em hidrogeologia (e.g. Chandra, 2016; Aizebeokhai et. al., 2017; Oware et al., 2019; Raji & Adedoyin, 2020). Assim, para minimizar dúvidas sobre a aplicação de geofísica, visto às limitações de campo (e.g., topografia irregular, tubulações enterradas, limites laterais geologicamente heterogêneos, perturbações elétricas e eletromagnéticas por redes de alta tensão) e validar suas modelagens, esta pesquisa apresenta a simulação de um maciço rochoso fraturado em modelo físico em escala de laboratório e a aplicação do método de Eletorresistividade, para analisar sua arquitetura estrutural, uma vez que as condições internas e de contorno são conhecidas.

No atual estado de arte, Moreira et al. (2019) simularam em laboratório um modelo físico de um maciço com um padrão de fraturamento subvertical e discutiram a aplicabilidade de diversos arranjos elétricos azimutais (e.g. Wishart et al., 2006; Watson & Barker, 2010). Seus resultados foram apresentados como elipses de resistividade elétrica aparente, o que trouxe implicações sobre a anisotropia do maciço. Neste sentido, esta pesquisa objetivou simular dois padrões subverticais de fraturamento, mapeá-los por meio de caminhamentos elétricos, avaliar regiões com maior acúmulo de água, e eleger o melhor arranjo elétrico, entre o Dipolo-Dipolo e o Gradiente para otimizar a aplicação do método. Portanto, espera-se até estimar o número de fraturas nas áreas levantadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Eletorresistividade

Por meio do método de Eletorresistividade, a resistividade elétrica é mensurada nos meios geológicos e nas fraturas que o segmentam. O método consiste em aplicar corrente elétrica (I) ao terreno e medir a diferença de potencial elétrico (ΔV) em vários pontos de observação em variadas posições em subsuperfície, de acordo com a Lei da Eletrodinâmica de Ohm. Assim, por meio dessas variáveis, é calculada a resistividade elétrica aparente (ρ_a) de cada ponto (Eq. 1), onde k é o fator geométrico que é dependente da posição/arranjo dos eletrodos (onde A e B injetam corrente, e M e N recebem o potencial elétrico). Os dados de resistividade aparente referentes à posição de vários pontos em subsuperfície, servem como input aos softwares especializados que os interpolam, gerando mapas de isolinhas desta grandeza (e.g. Ward, 1990; Loke, 1999; Kearey et al., 2002).

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

O caminhamento elétrico consiste em realizar medições, de forma a mobilizar o arranjo de eletrodos na direção das linhas de levantamento. No arranjo Dipolo-Dipolo (figura 1 – a), os eletrodos A e B são fixados em uma posição inicial, e as medições são realizadas, mobilizando M e N, ao longo da linha de levantamento pré-definida. Ao se chegar no final da linha, A e B são fixados na posição adjacente ao anterior, e medições sucessivas são realizadas com a mobilização de N e M, de forma que essa sistemática de medições seja seguida até o final da linha, e A, B, M e N ocupem posições adjacentes. Assim, a aquisição de dados consiste em um dipolo permanecer fixo enquanto o outro dipolo é mobilizado, de forma que será formado um conjunto de dados que

pertencerão ao plano ortogonal à superfície que contém a linha de levantamento até a profundidade que se pretende investigar. No arranjo Gradiente (figura 1 – b), A e B são mantidos fixos em todo o levantamento, de forma que as medições são realizadas por meio apenas da movimentação de N e M em linhas paralelas ao alinhamento AB. Assim, são realizados vários gradientes, simultaneamente, superpostos e com diferentes extensões de linha AB. No interior do retângulo central, as estações de medida possuem centro coincidente com o meio de AB e o lado menor não ultrapassa AB/2 ou AB/3. Neste caso, os dados são gerados em um plano numa determinada profundidade, sendo paralelo à linha de levantamento (e.g. Braga, 1997; Gallas et al. 2001; Kearey et al., 2002; Gandolfo, 2007).

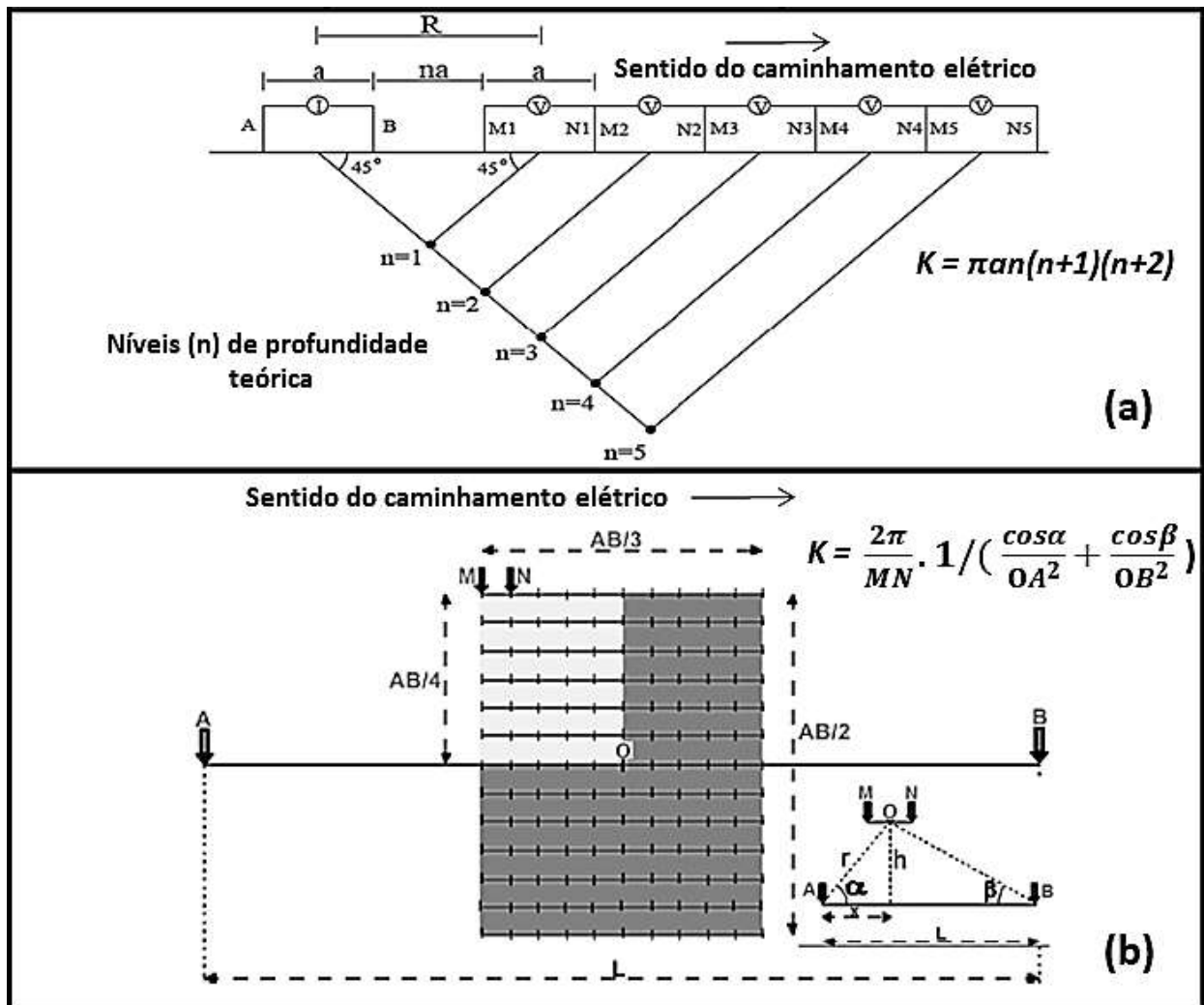


Figura 1. Esquematização das configurações de levantamentos com os arranjos Dipolo-Dipolo (a) e Gradiente (b). Os fatores geométricos também são apresentados (modificado de Braga, 2007).

No cálculo da profundidade teórica de investigação (Z), considera-se a resistividade aparente. No caso do arranjo Dipolo-Dipolo, Z é definida como sendo a metade do espaçamento entre os pontos medianos entre os dipolos e, no caso do Gradiente, como sendo igual a um quarto do espaçamento entre os eletrodos A e B (e.g. Telford et al., 1990; Kearey et al., 2002; Saraiva et al., 2017).

2.2. Simulações em Modelos Físicos Reduzidos

Diversos pesquisadores têm usado modelos físicos reduzidos para analisar a resposta de maciços geológicos descontínuos (e.g. Wishart et al., 2006; Watson & Barker, 2010; Moreira et al., 2019). Uma das vantagens destes modelos é a de permitir maior número de observações quando comparadas com investigações no campo e de se conhecerem perfeitamente as características elétricas dos materiais constituintes e das condições de contorno. Goudswaard (1957) provou que não se deve utilizar mais que 30% do comprimento do modelo para se evitar a influência do material do tanque (e.g. vidro; acrílico). O grau de saturação do sistema influencia a resposta da resistividade elétrica, analogamente, às implicações matemáticas apresentadas por Khalil & Santos (2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para montagem do modelo reduzido foram aproveitadas algumas configurações e peças do modelo de Moreira et al. (2019). O tanque foi construído com placas de acrílico com espessura de 0,01 m. Suas dimensões foram 1,00 m x 1,00 m x 0,50 m. Para compor o maciço rochoso simulado (figura 2), foram utilizadas placas de mármore calcítico cristalino inalterado de cor branca, com dimensões 0,20 m x 0,09 m x 0,02 m. As placas foram espaçadas entre si, simulando fraturas abertas com cerca de 0,002 m de vão. As dimensões do maciço foram 0,48 m x 0,41 m x 0,20 m e ele foi posicionado no centro do tanque. O limite e o espaçamento entre as placas simularam dois padrões de fraturamento: uma família de fraturas orientadas na direção NS (espaçadas entre si de 0,02 m), denominada J_1 , e outra família, orientada $N60^\circ E$, por sua vez menos espaçada que a primeira (a cada 0,078 m), denominada J_2 . Uma camada de areia (granulometria média) com espessura de 0,02 m foi colocada sobre o maciço. O conjunto ensaiado foi submetido à saturação em água, simulando assim, um maciço rochoso fraturado coberto por solo saturado e com fraturas preenchidas por material inconsolidado e saturado.

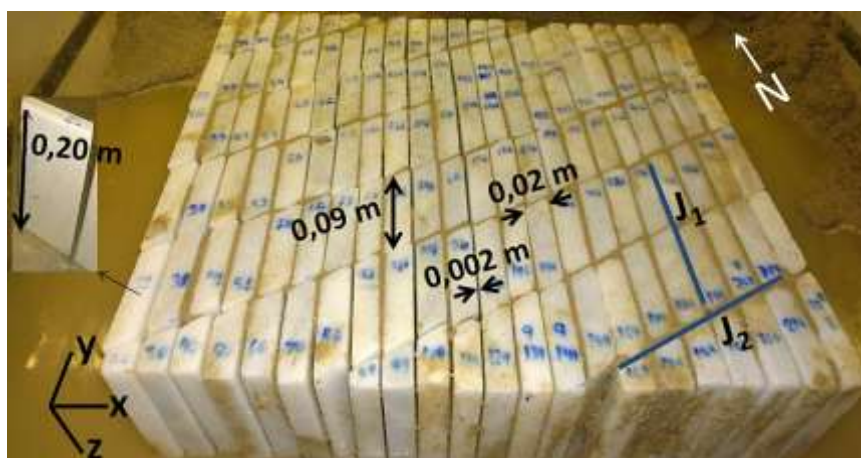


Figura 2. Configuração de montagem do maciço rochoso fraturado no tanque de acrílico, com placas de mármore, limitadas por duas famílias de fraturas (paralelas às linhas azuis) nas direções NS (J_1) e $N60^\circ E$ (J_2). São discriminadas as dimensões das placas e da abertura das fraturas.

Preliminar e separadamente, foram aferidos os valores de resistividade elétrica da rocha e da areia saturada. A resistividade do mármore é na ordem de 4000 $\Omega.m$ e da areia saturada, em torno de 100 $\Omega.m$ por causa da não-uniformidade do grau de saturação. As superfícies das placas de mármore têm irregularidades e há certas variações na abertura das fraturas de forma a gerar regiões que ultrapassam o vão de 0,002 m, permitindo a passagem preferencial e maior concentração de água. A hipótese é que por meio dos levantamentos possa se identificar regiões como essa.

Os arranjos ensaiados foram: Dipolo-Dipolo e Gradiente, pela técnica de caminhamento elétrico. Foi utilizado o resistivímetro de corrente direta da Landmapper ERM_03, produzido pela Landviser Research Enlightening. Foram modeladas seções em planta (slices) de resistividade

aparente em profundidades definidas, como forma de comparar os arranjos elétricos. As medidas foram repetidas ao menos três vezes para cada ponto e a média foi considerada como o resultado final. Medidas com altos desvios foram desconsideradas.

A modelagem de cinco slices com o arranjo Dipolo-Dipolo e de dois com o Gradiente, resultou em uma boa comparação entre eles. A tabela 1 apresenta o dimensionamento e as configurações dos arranjos. Os dados foram processados no software Surfer (Golden, 2010). As escalas de resistividade elétrica aparente foram padronizadas à uma única, para apresentação em todos os slices.

Tabela 1. Dimensionamento e configurações gerais dos arranjos.

Parâmetro	Dipolo-Dipolo (Direção de Levantamento EW)	Gradiente (Direção de Levantamento EW)	Gradiente (Direção de Levantamento N30°W)
Espaçamento entre M e N (m)	0,04	0,02	0,01
Espaçamento entre A e B (m)	0,04	0,50	0,44
Número de linhas de levantamento	3	17	15
Comprimento das linhas (m)	0,47	0,17	0,14
Espaçamento entre linhas (m)	0,12	0,02	0,01
Número de levantamentos	5	1	1
Profundidades teóricas investigadas (m)	0,4; 0,6; 0,8; 0,10; 0,12	0,13	0,11
Áreas de levantamento (m ²)	0,17	0,04	0,02

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Modelagem com Arranjo Dipolo-Dipolo

São apresentados na figura 3, *slices* paralelos à superfície, de isolinhas de resistividade elétrica aparente e também em mapas de relevo sombreado. Os baixos-relevos caracterizam os baixos valores de resistividade aparente relativamente à profundidade investigada, interpretados como anomalias geradas pela contribuição maior das fraturas preenchidas por areia saturada e os altos-relevos como anomalias geradas pela contribuição maior das placas de mármore.

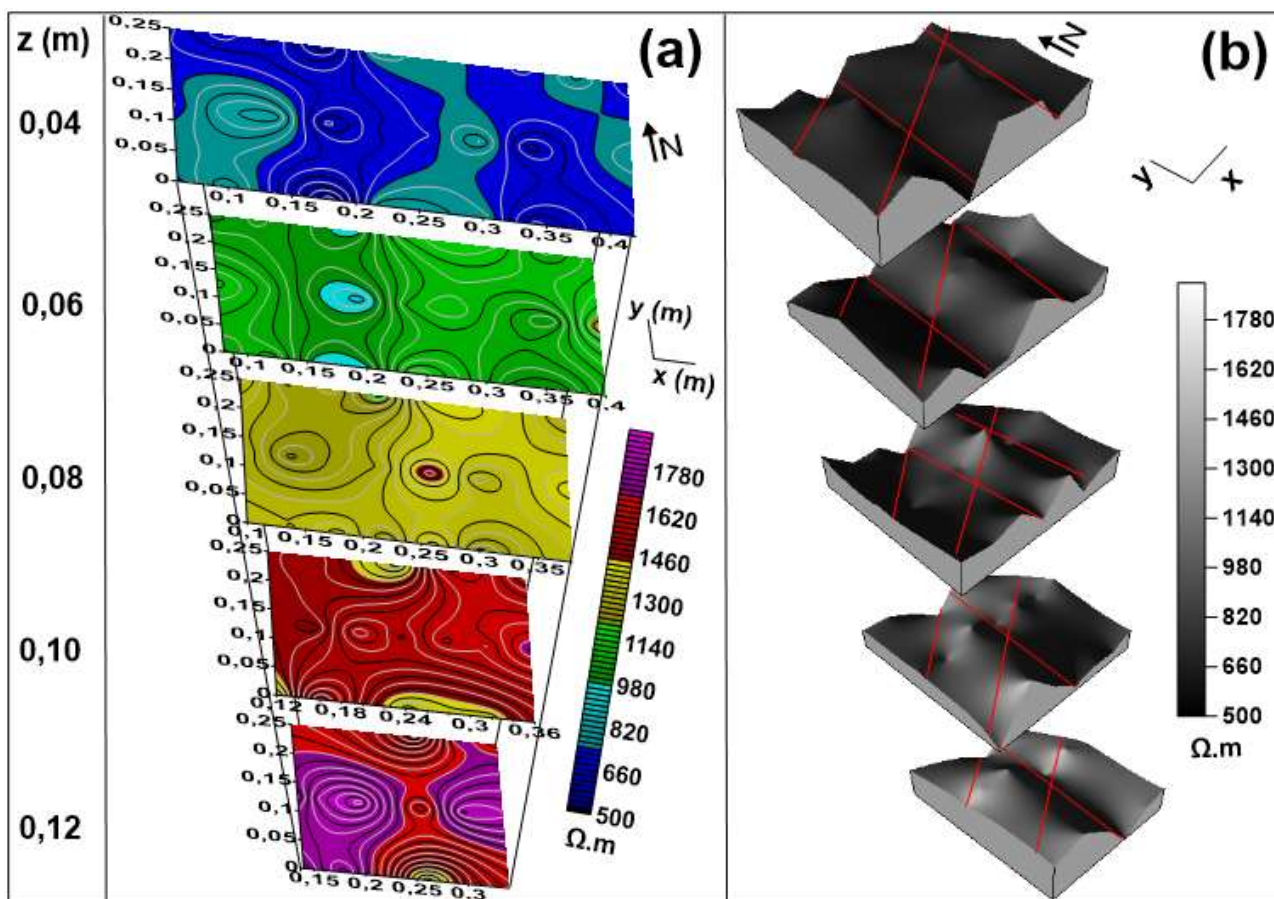


Figura 3. *Slices* de isolinhas (a) e de mapa sombreado de relevo (b) de resistividade elétrica aparente, em cinco profundidades (z) distintas. As linhas vermelhas estão sobrepostas aos alinhamentos de baixas anomalias nos modelos em perspectiva. Os valores variam entre 500 e 1900 $\Omega.m$.

Os levantamentos por profundidades distintas mostram que à medida que se diminui a profundidade de investigação, os valores de resistividade aparente diminuem também. Isto demonstra que a cobertura de areia saturada influencia o campo elétrico relativo à interação entre as placas de mármore e as fraturas, no sentido de diminuir a resistividade aparente. Nos *slices* se observam padrões em que anomalias de formato, aproximadamente, circular, estão alinhadas próximo à direção NS. Outro padrão é a disposição espacial das isolinhas de resistividade aparente na direção NS. Portanto, ambos os tipos de padrões estão relacionados à contribuição da família de fraturas J_1 , mas não é possível associar cada anomalia pontual a cada fratura específica desta família. Ao atingir profundidades maiores, nota-se também, a perda de resolução destes padrões de anomalias.

São observadas inflexões para a direção NE nas isolinhas de trend NS, sobretudo, nas porções a NE das áreas levantadas. Algumas das inflexões se alinham com anomalias circulares menores, implicando na resposta elétrica das fraturas da família J_2 . Esta resposta é bem pronunciável no *slice* na profundidade 0,12 m, em que uma anomalia circular central (entre 1460 e 1620 $\Omega.m$) está alinhada com isolinhas de anomalias (>1620 $\Omega.m$) que ocupam regiões maiores. Portanto, neste caso, também não é possível associar inflexões e alinhamentos de anomalias pontuais a fraturas específicas da família J_2 .

A faixa de valores de resistividade, entre 500 e 1900 $\Omega.m$, é inconsistente com a ordem de grandeza das placas de mármore (4000 $\Omega.m$) por se tratar de resistividade aparente. Há procedimentos matemáticos para aproximar estes dados aos do condicionamento real do maciço. Contudo, os resultados alcançados pelo arranjo Dipolo-Dipolo nos levantamentos ortogonais à família J_1 e que trazem respostas mais pronunciáveis das mesmas por causa desta relação de ortogonalidade, são razoáveis para a averiguação qualitativa de fraturas do maciço.

As áreas dos levantamentos com o arranjo Dipolo-Dipolo são muito maiores que as áreas com o Gradiente. Este é um ponto negativo do ponto de vista de se realizar levantamentos em áreas com continuidades laterais para cravamento de eletrodos, relativamente curtas e/ou com limitações topográficas diversas.

4.2. Modelagem com Arranjo Gradiente

A figura 4 apresenta o resultado do levantamento Gradiente na direção EW, onde é verificada uma faixa de valores de resistividade (entre 500 e 1400 $\Omega.m$), também mais baixa que a ordem de grandeza das placas de mármore. Contudo, a distinção de um padrão de anomalias alongadas na direção NS é bem mais definido que os padrões dos produtos gerados pelos levantamentos do arranjo Dipolo-Dipolo.

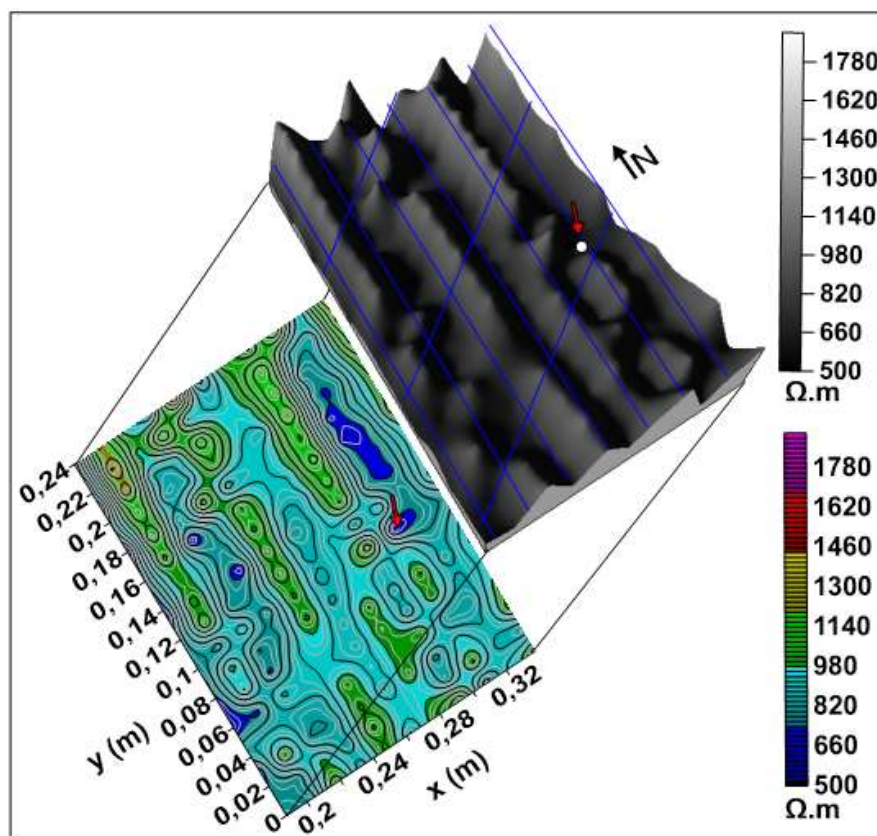


Figura 4. Slice de isolinhas e de mapa sombreado de relevo de resistividade elétrica aparente, na profundidade teórica $z = 0,13$ m. O levantamento foi realizado na direção EW. As linhas azuis estão sobrepostas aos alinhamentos de baixas anomalias. Os valores variam entre 500 e 1400 $\Omega.m$.

Com o arranjo Gradiente, mesmo com a investigação de profundidade relativamente maior (0,13 m), uma vez que o outro arranjo investigou a profundidade máxima de 0,12 m, o resultado implicou em uma interpretação quantitativa, uma vez que a modelagem dos dados em relevo sombreado permite distinguir anomalias pontuais e sua respectiva associação com fraturas específicas da família J_1 . Nesse sentido, foram traçadas as posições das fraturas sobre o modelo em perspectiva, em que se nota que a maioria é coincidente com as regiões de baixo-relevo que estão associadas a baixas anomalias ($< 1000 \Omega.m$ – matizes azuis). Quantitativamente, das sete fraturas J_1 situadas na área de levantamento, seis foram mapeadas por meio do Gradiente, o que responde à eficiência de cerca de 86% na estimativa do número de fraturas por família.. Por outro lado, anomalias com valores $> 1000 \Omega.m$ (cores verde ao laranja), estão associadas à contribuição maior das placas de mármore.

Ressaltam-se anomalias nas porções NE e SW com valores $< 600 \Omega.m$ (matiz azul forte) que implicam em regiões com maior acúmulo de água. Uma seta vermelha (figura 4) acusa um ponto onde se nota este tipo de anomalia na posição próxima da interseção de uma fratura J_1 com uma J_2 . A discriminação deste ponto simularia um ponto para intervenção geotécnica (e.g. para alocação de região preferencial para drenagem) e até um ponto potencial para exploração de água em uma campanha de prospecção.

O alinhamento dos limites das anomalias alongadas na direção NS, bem como, a consideração de algumas inflexões para NE e o alinhamento de anomalias circulares pequenas implicam na discriminação da resposta elétrica da família J_2 . Contudo, há dificuldades na interpretação dessa resposta, e para melhorar o mapeamento da família J_2 , foi realizado um levantamento ortogonal à sua direção (figura 5).

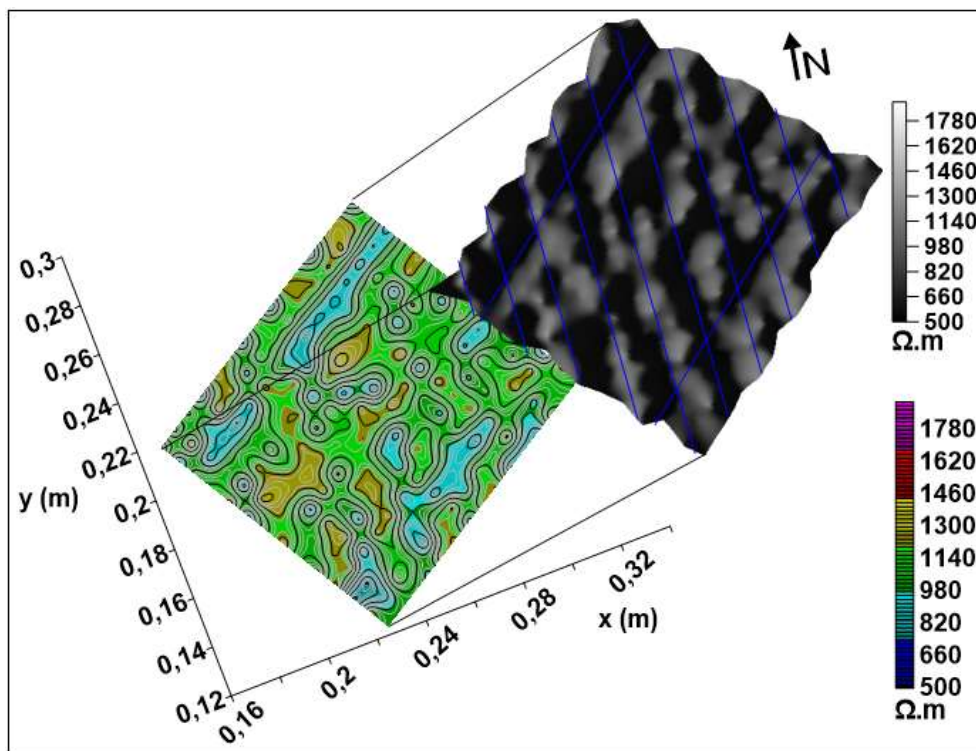


Figura 5. Slice de isolinhas e de mapa sombreado de relevo de resistividade elétrica aparente, na profundidade teórica $z = 0,10$ m. O levantamento foi realizado na direção $N30^{\circ}W$. As linhas azuis estão sobrepostas aos alinhamentos de baixas anomalias. Os valores variam entre 800 e $1400 \Omega.m$.

No slice do Gradiente na direção $N30^{\circ}W$ observam-se baixas anomalias alongadas ($< 980 \Omega.m$) que ocupam regiões maiores alinhadas na direção NE. Isto implica numa resposta melhorada das fraturas J_2 . Por outro lado, as fraturas J_1 também apresentam boa resposta associando-se a anomalias ($< 1000 \Omega.m$ – verde forte ao azul) de tamanhos menores e alinhadas na direção NS. Já as anomalias de valores maiores (entre 1000 e $1400 \Omega.m$ – verde ao laranja) implicam na resposta das placas de mármore. As linhas azuis sobrepostas nas regiões de baixo resistivo representam a posição das fraturas. No caso das anomalias orientadas NE, são coincidentes com J_2 e, no caso das orientadas NS, das dez fraturas J_1 situadas na área de levantamento, oito foram mapeadas, respondendo à eficiência de 80%.

5. CONCLUSÕES

Por meio desta pesquisa provou-se, experimentalmente, expressiva eficiência do método geofísico de Eletrorresistividade na avaliação estrutural de maciço rochoso. Portanto, na

necessidade de verificação de profundidades definidas com perfis de mapas de resistividade elétrica aparente paralelos à superfície, o arranjo Gradiente é o recomendado para uma análise mais pontual em termos de até estimar o número de fraturas em cada família investigada, com eficiência podendo ultrapassar 80%. Além disso, apresenta maior amostragem por profundidade e melhor resolução da arquitetura estrutural, comparativamente, ao Dipolo-Dipolo que, neste caso, este é mais voltado para uma análise qualitativa.

Ficou provado também que para contornar as dificuldades de levantamentos geotécnicos em áreas relativamente pequenas e com limitações topográficas diversas, o Gradiente mostrou-se mais eficiente que o Dipolo-Dipolo no alcance de profundidade relativamente mais alta, e mesmo assim, requerendo áreas de movimentação de cabos e eletrodos relativamente mais baixas. Em adição, essa integração é recomendada para discriminar regiões no maciço em que há maior acúmulo de água e/ou fluxo preferencial, servindo como subsídio para alocação de regiões do maciço para instalação de drenos, bem como, acusar pontos potenciais para exploração de água subterrânea em campanhas.

Recomenda-se que a aquisição de dados elétricos seja ortogonal às estruturas investigadas, o que foi observado na melhoria da resposta elétrica da família J_2 no levantamento na direção N30°W com o arranjo Gradiente. Ressalta-se atenção na definição das profundidades de investigação, visto que a cobertura de solo sobre a rocha, que no caso deste trabalho foi a areia saturada sobre as placas de mármore, tenha influência mínima ou nenhuma sobre o campo elétrico do maciço, pois pode interferir nos contrastes elétricos e dificultar as interpretações.

Por fim, para melhorar os resultados das modelagens em estudos futuros, sugere-se a utilização de procedimentos matemáticos, denominados inversões, para aproximar os dados de resistividade aparente ao condicionamento real do maciço. Além disso, sugerem-se levantamentos azimutais nestes padrões de fraturamento para analisar a anisotropia elétrica e discutir as implicações geoestruturais do maciço, bem como, estimar a porosidade fissural (secundária) gerada pelas fraturas.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), à CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG, pelo apoio.

REFERÊNCIAS

AIZEBEOKHAI, A.P. et al. (2017) *Geoelectrical resistivity data sets for subsurface characterisation and aquifer delineation in Iyesi, southwestern Nigeria*. J Data in Brief, Vol. 15, p. 828-832. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.10.057>.

BRAGA, A.C.O. (1997) *Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica - Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 169 p.

BRAGA, A.C.O. (2007) *Métodos geoeletricos aplicados nos estudos de captação e contaminação das águas subterrâneas*. São Paulo, UNESP, 79p.

CARDOSO, L.H. et al. (2018) *Geophysical analysis of natural caves in iron lithotypes in the region of Mariana, Southeastern Quadrilátero Ferrífero, Brazil*. Int Eng J, Vol. 71, p. 561-570. <https://doi.org/10.1590/0370-44672017710171>.

CHANDRA, P.C. (2016) *Groundwater Geophysics in Hard Rock*. CRC Press/Balkema.

GALLAS, J.D.F. et al. (2001) *Métodos e técnicas geoeletricas rasas na delimitação de área afetada por ruptura em teto de túnel urbano*. Brazil J Geophys, Vol. 19, p. 33-46.

GANDOLFO, O.C.B. (2007) *Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa*. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 215 p.

- GOLDEN SOFTWARE (2010) SURFER ver. 9.11.947. <https://www.goldensoftware.com/products/surfer/trial>. Último acesso: 27/11/2019.
- GOUDSWAARD, W. (1957) *On the effect of the tank wall material in geoelectrical model experiments*. Geophys Prosp, Vol 5, p. 272–281. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1957.tb01433.x>.
- KEAREY, P. et al. (2002) *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell, Bristol.
- KHALIL, M.A. & SANTOS, F.A.M. (2009) *Influence of degree of saturation in the electric resistivity–hydraulic conductivity relationship*. Surv Geophys, Vol. 30, p. 601–615. <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9072-4>.
- LOKE, M.H. (1999) *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies - A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. <https://pages.mtu.edu/~ctyoung/LOKENOTE.PDF>. Último acesso: 02/10/2019.
- MOREIRA, S.S. et al. (2019) *A comparative evaluation of vertical fractures using diferente azimuthal electrical resistivity survey arrays*. Near Surf Geophys, Vol. 17, p. 345-357. <https://doi.org/10.1002/nsg.12047>.
- OWARE, E.K. et al. (2019) *Basis-constrained Bayesian Markov-chain Monte Carlo difference inversion for geoelectrical monitoring of hydrogeologic processes*. Geophysics, Vol. 84, p. 37-42. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0643.1>.
- OWUSU-NIMO, F. & BOADU, F. (2020) *Evaluating effective stress conditions in soils using non-invasive electrical measurements – Laboratory studies*. J Appl Geophys. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103961>.
- PELLERIN, L. (2002) *Applications of electrical and electromagnetic Methods for environmental and geotechnical Investigations*. Surv Geophys, Vol. 23, p. 101–132. <https://doi.org/10.1023/A:1015044200567>.
- PERGAVO, E. et al. (2001) *Joint influence of resistivity anisotropy and inhomogeneity for a single dipping interface between isotropic overburden and anisotropic basement*. In: Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems. 1-10p. <https://doi.org/10.4133/1.2922884>.
- RAJI, W.O. & ADEDOYIN, A.D.A. (2020) *Dam safety assessment using 2D electrical resistivity geophysical survey and geological mapping*. J King Saud Univ - Sci, Vol. 32, p. 1123-1129. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.10.016>.
- SARAIVA, R.M. et al. (2017) *Locações de poços em ambiente cristalino: da análise estrutural aos dados de eletroresistividade. Estudo de caso nos municípios de São Gonçalo do Amarante e Aratuba, Ceará*. Águas Subterrâneas, <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.28788>.
- TELFORD, W.M. et al. (1990) *Applied Geophysics*. Cambridge University, Cambridge.
- WARD, S.H. (1990) *Resistivity and Induced Polarization Methods*, in: Investigations in Ward, S.H (Ed.), Geophysics Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, USA, pp. 147-189.
- WATSON, K.A. & BARKER, R.D. (2010) *Tank modeling of azimuthal resistivity surveys over anisotropic bedrock with dipping overburden*. Near Surf Geophys, Vol. 8, p. 297-309. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2010019>.
- WISHART, D.N. et al. (2006) *Self potential improves characterization of hydraulically active fractures from azimuthal geoelectrical measurements*. Geophysical Research Letters. Vol. 33, 6 p. <https://doi.org/10.1029/2006GL027092>.