

Levantamentos Geométricos Azimutais em Modelos Reduzidos para Caracterização de Maciços Fraturados

Simone Aparecida Simim Moreira

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, simonesimim@gmail.com

Luís de Almeida Prado Bacellar

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, luisapbacellar@gmail.com

RESUMO: Caracterizar maciços rochosos fraturados em subsuperfície é de notável importância na geotecnia, especialmente para evitar percolação de fluidos por descontinuidades, que podem ocasionar problemas de instabilidade geotécnica. Várias metodologias podem ser empregadas para caracterizar descontinuidades em rochas, tais como sondagens convencionais, ensaios de permeabilidade, entre outros. A geofísica vem também sendo empregada para esse fim, principalmente usando o método da eletrorresistividade azimutal. Essa técnica consiste em realizar levantamentos eletrorresistivos em torno de um ponto central, deslocando os arranjos de eletrodos em incrementos angulares pré determinados no sentido horário (azimute). Pode-se usar todos os tipos de arranjos de eletrodos. Nesse trabalho, a técnica foi empregada em um modelo reduzido confeccionado em laboratório, objetivando comparar diferentes tipos de arranjos e assim averiguar o mais efetivo e sensível à anisotropia elétrica. Foram usados os arranjos Wenner, Quadrático e Dipolo-dipolo equatorial, com distintos espaçamentos entre os eletrodos. Com os dados dos levantamentos, pode-se calcular o coeficiente de anisotropia, que afere o quanto um maciço é anisotrópico ou não. Além disso, dados das resistividades aparente médias, máximas e mínimas também foram adquiridos nos ensaios. Por fim, notou-se que o arranjo mais sensível à anisotropia elétrica foi o quadrático.

PALAVRAS-CHAVE: maciços fraturados, eletrorresistividade, levantamento azimutal, modelo reduzido, anisotropia.

1 INTRODUÇÃO

Em geotecnia, é de suma importância caracterizar os maciços rochosos para evitar problemas diversos de instabilidade geotécnica. Pode-se enumerar vários deles, por exemplo, a percolação excessiva de água em um maciço rochoso fraturado. Essa caracterização é importante em obras geotécnicas, como túneis, fundações de barragens, taludes, estudo de aquíferos fraturados, entre outros.

Nesse sentido, conhecer as características das descontinuidades nos maciços rochosos, sejam elas fraturas, diáclases, contatos litológicos, é essencial para aperfeiçoar e aprimorar o uso e

ocupação dos mesmos, evitando transtornos muitas vezes irreversíveis.

Obter informações sobre o comportamento de uma rocha em subsuperfície requer medições de variações das suas propriedades físicas, e dentre elas pode-se destacar a anisotropia, que é definida como a característica que um material possui de variar alguma de suas propriedades físicas em função da direção (Taylor e Flemming, 1988).

Assim, pretende-se com esse trabalho, propor novas técnicas de aquisição de dados e interpretações dos parâmetros anisotrópicos a fim de caracterizar maciços rochosos fraturados, usando o método da eletrorresistividade azimutal. O método foi realizado em um

modelo reduzido de maciço rochoso feito em placas de mármore, inseridas dentro de um tanque de acrílico, semelhante aos modelos realizados por Wishart *et al.*, (2006) e Watson e Barker (2010).

O objetivo principal desse estudo é caracterizar os maciços rochosos quanto à anisotropia elétrica, além de investigar o arranjo de eletrodos mais adequado e que mostre o melhor resultado para caracterizar a anisotropia elétrica do meio fraturado. Com os resultados pretende-se aferir a anisotropia de um maciço rochoso em termos quantitativos.

Para os levantamentos eletrorresistivos azimutais foram usados os arranjos Werner, Quadrático e Dipolo-dipolo equatorial, posicionados no centro do modelo reduzido.

2 ELETORRESISTIVIDADE APLICADA À MACIÇOS FRATURADOS

2.1 Método da eletrorresistividade

Esse método consiste na aplicação de corrente elétrica artificial em um terreno, com auxílio de eletrodos de corrente e medidas de diferença de potencial, utilizando eletrodos de metal. O método mais simples de eletrorresistividade utiliza quadro eletrodos que podem se dispor em arranjos lineares e não- colineares (Kearey *et al.*, 2009).

Os arranjos lineares mais conhecidos são a configuração Wenner e Schlumberger. A primeira configuração de eletrodos admite quatro eletrodos, onde os de corrente (AB) e os de potencial (MN) são mantidos a uma mesma separação, necessitando que todos sejam movidos juntos em cada levantamento. Já na configuração Schlumberger os eletrodos de potencial (MN) são mantidos fixos em relação a um ponto central, enquanto os de correntes (AB) são movidos de forma crescente em relação o mesmo ponto central (Kearey *et al.*, 2009) (Figura 1).

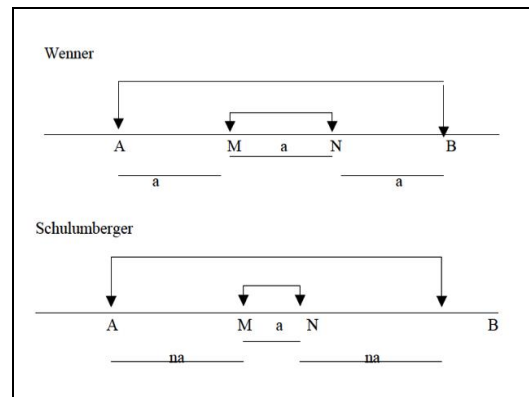


Figura 1: Configuração dos arranjos Wenner e Schlumberger (Barbosa, 2003).

Os arranjos não colineares mais usados são o dipolo-dipolo e quadrático. O primeiro utiliza dois dipolos de recepção (MN) e dois de corrente (AB) separados de uma mesma distância a . Durante o levantamento o dipolo MN é movido, se distanciando do dipolo AB, que se mantém fixo, de um incremento na (Gandolfo, 2007). Uma variação desse tipo de arranjo é o dipolo-dipolo equatorial, cuja diferença em relação aos outros arranjos dipolos é que os eletrodos de corrente e de potencial estão posicionados paralelamente entre si, separados por uma distância $b=na$ (Loke, 1999) (Figura 2).

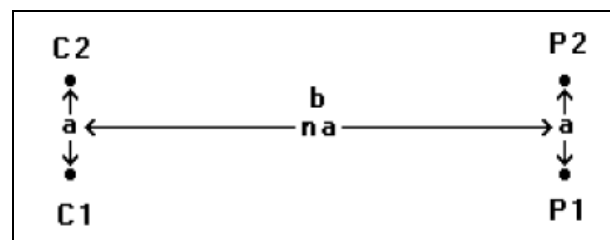


Figura 2: Configuração do arranjo dipolo-dipolo equatorial (Loke, 1999).

A configuração do arranjo quadrático consiste em dispor os quadro eletrodos, em torno de um ponto central e fazer o espaçamento a entre eles ser o lado de um quadrado. São realizados três conjuntos de medidas, totalizando três quadrados (Figura 3). Para cada quadrado são realizadas três medições: duas medições perpendiculares chamadas de alfa (α) e beta (β) e a terceira, diagonal, gama (γ) (Lane *et al.*, 1995).

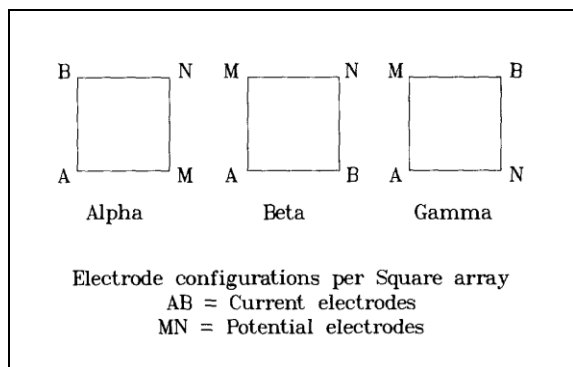


Figura 3: Relação dos três quadrados e as posições dos eletrodos no arranjo quadrático (Lane *et al.*, 1995).

Utilizando esses arranjos, pode-se optar por uma técnica conhecida como levantamento eletrorresistivo azimuthal, que é frequentemente usada para determinar a anisotropia elétrica do meio em subsuperfície, empregando o método da eletrorresistividade. Utilizam-se os mesmos equipamentos de um levantamento convencional de eletrorresistividade e consiste em rotacionar um arranjo de eletrodos em torno de um centro, realizando medições em incrementos angulares de acordo com o azimuth (Figura 4). Esse método vem mostrando interessantes resultados na análise da anisotropia elétrica de um meio (Watson e Barker, 2010).

A profundidade de investigação nessa técnica está intimamente ligada ao espaçamento entre os eletrodos, que normalmente não excede a 70 m em campo. Em laboratórios, podem ser utilizados espaçamentos centimétricos, a depender do tamanho dos tanques, pois se deve evitar os efeitos de borda (Watson & Barker, 2010). Na figura 5 estão representados exemplos de modelos reduzidos de maciços rochosos empregados para simular levantamentos geoeletricos.

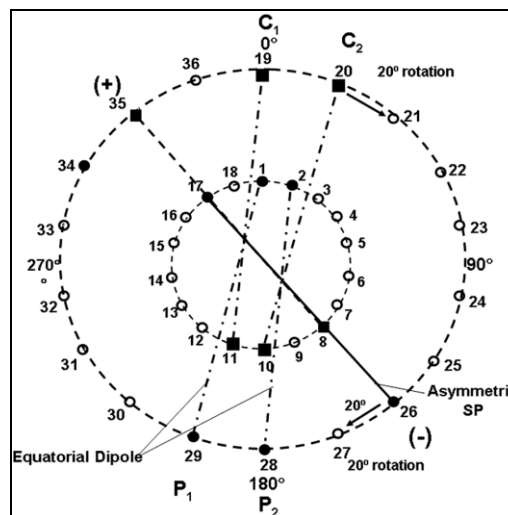


Figura 4: Geometria, em planta, do levantamento azimuthal de resistividade e potencial espontâneo (Wishart *et al.*, 2006).

Os dados de levantamento azimuthal, tanto em laboratório quanto em campo, caso o meio seja anisotrópico, geram uma elipse de resistividade aparente, que normalmente é plotada juntamente com os dados das direções das fraturas. Além disso, a raiz quadrada da razão entre a resistividade aparente na direção transversal (90°) e a resistividade na direção longitudinal (0°) fornece o coeficiente de anisotropia, que irá dizer o quanto um maciço é anisotrópico ou não (Watson & Barker, 2010). Se o coeficiente de anisotropia foi igual a 1, o meio é dito isotrópico. Se ficar entre 1 e 2, ocorre a anisotropia.

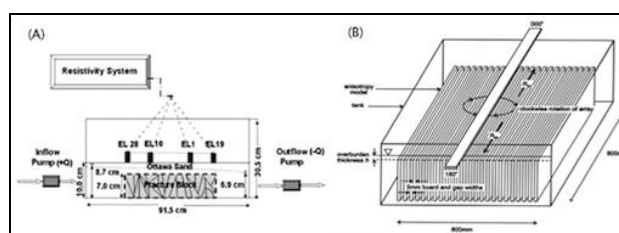


Figura 5: Em A, tem-se uma representação esquemática do modelo de Wishart *et al.*, (2006). Em B, representação do modelo de Watson & Barker (2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução desse trabalho foi necessário utilizar um tanque de acrílico transparente de base quadrada com 100 cm de aresta, altura de 50 cm e paredes com um centímetro de espessura. Dentro dele foram inseridas 25

placas lisas de mármore, com 50 cm x 20 cm e 2 cm de espessura. Essas placas foram justapostas e posicionadas no centro do tanque, obedecendo às recomendações de Goudswaard (1957), que sugere que somente cerca de 30% do tanque seja usado nos levantamentos elétricos, para se evitar interferências devido às bordas.

Por conseguinte, para esse trabalho considerou-se o tamanho supracitado, pois este permite que os ensaios sejam realizados dentro das condições desejadas, além de oferecer economia de material a ser usado. Foi simulado um padrão de descontinuidades, com pequenas fraturas formadas pelo encontro das placas e uma fratura central, com 0,5 cm de espessura, totalmente preenchida com areia.

O entorno do modelo, formado pelas placas de mármore, foi preenchido com areia, até o topo do modelo, com o objetivo de manter a estanqueidade do conjunto rocha e descontinuidades. Foi necessário realizar um reforço nas paredes do tanque, utilizando cintas de material resistente, a fim de evitar possíveis deformações que pudesse comprometer todo o experimento (Figura 6).

O tanque foi completado com 1,8 cm da mesma areia que preenche as descontinuidades e o entorno do tanque, para simular a influência de solo e assegurar a condição de que o maciço esteja enterrado. Em seguida, foi realizada a completa saturação do modelo, inserindo água potável no tanque até a superfície da areia.



Figura 6: Tanque de acrílico preenchido com areia. O modelo reduzido se encontra enterrado no tanque. Atenção aos reforços nas paredes da caixa.

O controle da saturação da areia foi garantido utilizando-se dois níveis d'água construídos com tubos de PVC de 15 cm de comprimento, e 1 ½" de diâmetro, situados nas extremidades da caixa.

Com o modelo montado, iniciaram-se os levantamentos eletroresistivos. Utilizou-se um resistivímetro de corrente contínua da marca AutoEnergia, quatro eletrodos de aço de 9,5 cm de comprimento, dois multímetros digitais, uma bateria e cabos. Para inserir os quatro eletrodos de aço, foi confeccionado uma galeria de eletrodos, composto pela plataforma de eletrodos e uma viga central de madeira (Figura 7). A plataforma de eletrodos consiste em placas de material inerte, como PVC, na qual os eletrodos foram conectados, conforme o arranjo solicitado (Figura 7).

Essa plataforma não deve estar em contato direto com a areia para evitar a formação de campos elétricos em lâminas de água. Para minimizar esse efeito, foi fixado em cada canto da plataforma pequeno sólidos de isopor de 2,5 cm de altura, fazendo com que o contato placa/areia seja insignificante.

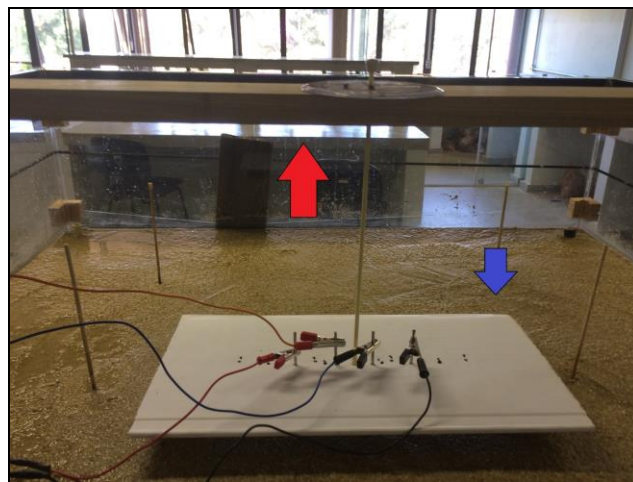


Figura 7: Suporte de eletrodos composto por plataforma de eletrodos (seta azul) e viga central de madeira (seta vermelha).

Na parte superior e central do tanque, posicionou-se uma viga de madeira com 100 cm de comprimento e 2,5 cm de espessura, presa nas paredes do tanque pelo lado de fora (Figura 7). Nela encontra-se, fixado no centro, um transferidor de ângulos, de onde pende uma haste de plástico, de 34 cm de comprimento, que vai do centro da viga até o centro da

plataforma de eletrodos. Essa haste tem movimentação livre e tem como função unir esses dois elementos (plataforma + viga de madeira) de forma a fazer girar a plataforma de eletrodos, quando for necessário modificar o azimuth para realizar as medidas de eletrorresistividade aparente.

Optou-se por usar incrementos de 15° , completando 360° , porém como o método de eletrorresistividade azimuthal é simétrico, realizaram-se medidas do azimuth 0° até o 165° , repetindo-se os valores no sentido oposto.

Consequentemente, foram feitas 12 leituras de corrente elétrica injetada e do potencial gerado para cada tipo de arranjo utilizado. A primeira medida se iniciou no azimuth 0° , sendo este paralelo à direção principal da descontinuidade simulada, representada pela seta preta nas elipses de resistividade. Foram usados os arranjos Wenner e Quadrático, com os espaçamentos entre os eletrodos de 4, 6, 8, e 10 cm cada, além do Dipolo-dipolo equatorial, com espaçamentos de 2, 3 e 4 cm.

Ao final dos levantamentos, os dados foram plotados em gráficos polares, utilizando o *software Grapher* da Golden, gerando elipses de resistividade aparente. Para todos os arranjos considerou-se o azimuth zero aquele coincidente com a linha dos eletrodos MN, visto que este é o dipolo de recepção.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Apresentação dos resultados

Para o levantamento azimuthal com o arranjo Wenner foram usados 4 espaçamentos entre os eletrodos, de 4, 6, 8 e 10 cm. Utilizando o *software Grapher*, gerou-se gráficos polares, que representam as elipses de resistividade aparente (Figuras 8 e 9).

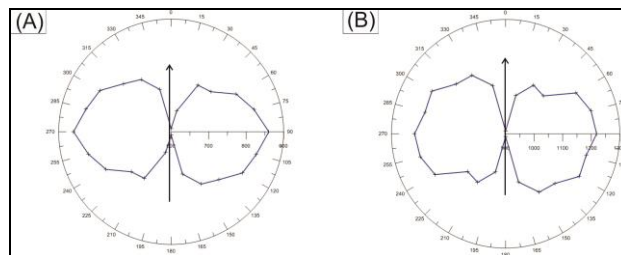


Figura 8: Elipses de resistividade aparente para o arranjo Wenner, espaçamentos 4 cm (A) e 6 cm (B).

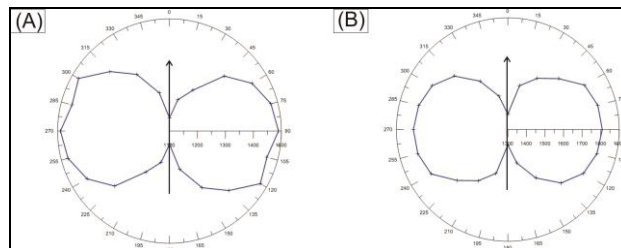


Figura 9: Elipses de resistividade aparente para o arranjo Wenner, espaçamentos 8 cm (A) e 10 cm (B).

Já o arranjo Quadrático, nesse trabalho, foi contemplado em 4 espaçamentos entre os eletrodos, análogo ao arranjo Wenner (4, 6, 8 e 10 cm). De forma semelhante ao Wenner, os dados de resistividade aparente geraram as elipses das figuras 10 e 11.

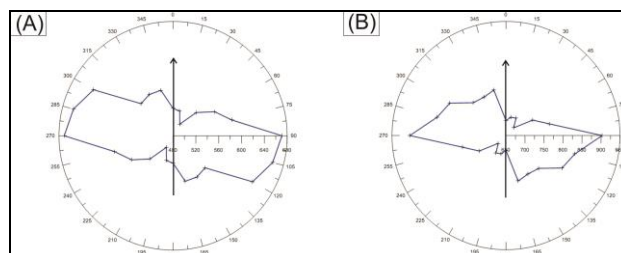


Figura 10: Elipses de resistividade aparente para o arranjo Quadrático, espaçamentos 4 cm (A) e 6 cm (B).

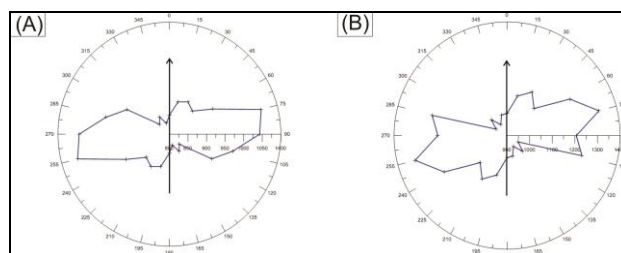


Figura 11: Elipses de resistividade aparente para o arranjo Quadrático, espaçamentos 8 cm (A) e 10 cm (B).

Para o arranjo Dipolo-dipolo equatorial foram utilizados três espaçamentos diferentes entre os eletrodos, sendo eles 2 cm, 3 cm e 4 cm. Conforme se aumenta os espaçamentos entre AB e MN, a distância entre os pontos médios dos dipolos também aumenta. Nesse

caso, utilizou-se o fator multiplicador de 5, sendo as distâncias entre o centro dos dois dipolos de 10 cm, 15 cm e 20 cm, correspondente aos espaçamentos de 2 cm, 3 cm e 4 cm, respectivamente. Após tratamento dos dados no *software Grapher*, tem-se as elipses das figuras 12 e 13 .

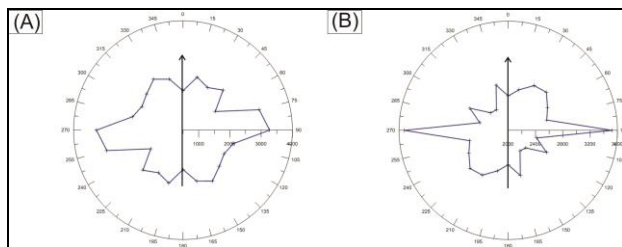


Figura 12: Elipses de resistividade aparente para o arranjo dipolo-dipolo equatorial, espaçamentos 2 cm (A) e 3cm (B).

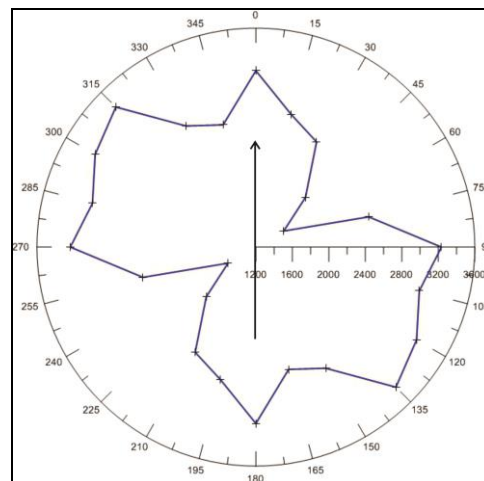


Figura 13: Elipses de resistividade aparente para o arranjo dipolo-dipolo equatorial, espaçamento 4 cm.

Além disso, com os dados apurados também foi possível encontrar os valores das resistividades aparentes médias, as resistividades no eixo maior e menor da elipse, além do coeficiente de anisotropia para cada arranjo, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Dados dos levantamentos eletrorresistivo azimuthal para os quatro arranjos empregados.

Coeficiente de Anisotropia e Resistividade Média					
Arranjo	Espaçamento (cm)	Resistividade Eixo maior (ohm.m)	Resistividade Eixo menor (ohm.m)	Coeficiente de anisotropia	Resistividade Média (ohm.m)
Wenner	0,04	860,485	608,637	1,19	723,687
	0,06	1218,957	910,104	1,16	1053,270
	0,08	1489,756	1146,232	1,140	1306,754
	0,1	1808,700	1382,537	1,144	1581,327
Quadrático	0,04	660,6695	524,8663	1,12	588,866
	0,06	903,0198	689,3665	1,14	788,994
	0,08	1055,7390	830,3110	1,13	936,265
	0,1	1068,0882	917,1845	1,08	989,765
DDE	0,02	3270,2280	1761,0304	1,36	2399,786
	0,03	3523,6113	2504,3609	1,19	2970,588
	0,04	2732,8670	1552,2684	1,33	2059,646

4.2 Discussão dos resultados

Os gráficos polares gerados nas análises dos dados de resistividade aparente possuem forma

de uma elipse, evidenciando um meio anisotrópico, visto que se o meio fosse isotópico, geraria um gráfico com padrão circular. A elipse de resistividade aparente

mostra que os três arranjos são sensíveis à detecção da anisotropia elétrica e que os menores valores de resistividade, ou seja, maiores valores de condutividade elétrica ocorrem na direção de fraturamento principal.

Comparando-se as elipses em todos os levantamentos, nota-se que nos arranjos quadrático e dipolo-dipolo equatorial, a variação de resistividade aparente é maior que no arranjo Wenner, devido às maiores irregularidades nos contornos das elipses, sugerindo que esses arranjos sejam mais sensíveis à detecção da resistividade aparente que o Wenner. Para corroborar essa afirmação, os valores das resistividades maior e menor apresentam maiores variações para os arranjos Quadráticos e Dipolo-Dipolo Equatorial (Tabela 1).

É possível notar que os menores valores de resistividade aparente são os obtidos pelo arranjo quadrático, seguido do Wenner e dipolo-dipolo equatorial (Tabela 1).

Os coeficientes de anisotropia elétrica para o arranjo Wenner variam de 1,14 a 1,18; no arranjo quadrático de 1,13 a 1,17 e no arranjo dipolo-dipolo equatorial de 1,22 a 1,47. Esse fato denota que o arranjo Wenner e o Quadrático apresentam uma anisotropia homogênea, menos variável que o Dipolo-dipolo equatorial, pois os valores dos coeficientes para esses arranjos sofrem uma pequena variação. Já o arranjo Dipolo-dipolo equatorial mostra uma anisotropia heterogênea, uma vez que os coeficientes sofrem uma variação maior (Habberjams, 1975).

5 CONCLUSÃO

Os dados obtidos no experimento mostraram que o uso da técnica de levantamento eletrorresistivo azimutal é eficaz para determinar quantitativamente a anisotropia elétrica de um maciço rochoso fraturado em subsuperfície. O arranjo quadrático se mostrou o mais sensível a anisotropia elétrica, pois apresentam os menores valores de resistividade aparente, indicando maior sensibilidade à detecção da condutividade elétrica.

O arranjo dipolo-dipolo equatorial, apesar de apresentar altos valores de coeficientes de anisotropia, foi o que teve maiores valores de resistividade aparente, ou seja, menor condutividade elétrica.

Sugere-se que sejam realizadas novas fases do experimento, com outras espessuras de cobertura de areia para que se possa simular a influência de solo sobre o modelo. Além disso, pode-se simular outros padrões de descontinuidades para analisar a resposta geoeletricas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFOP, à Fapemig (Projeto Universal) e ao CNPq, além de todas as pessoas que se envolveram e contribuíram para o desenvolvimento da mesma.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, M. S. C. (2003). *Notas de Aulas- Geofísica*. Ufop. Minas Gerais. 256 p.
- Gandolfo, O. C. B. (2007). *Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa*. Tese de doutorado. USP. São Paulo. 215 p.
- Goudswaard, W. (1957). On the effect of the tank wall material in geoelectrical model experiments. *Geophysical Prospecting* 5, 272–281.
- Habberjam, G. M. (1975). Apparent Resistivity Anisotropy and Strike measurements. *Geophysical Prospecting*, Vol. 23, pp 211-247.
- Kearey P.; Brooks M.; Hill I. (2009) Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho. **Geofísica de Exploração**. Oficina de Textos. São Paulo. 438 p.
- Lane, J. W.; Haeni, F. P.; Watson, M. (1995). Use of a square array direct-current resistivity method to detect fractures in crystalline bedrock in New Hampshire. *Ground Water*. V.33 nº 3. P. 476-485.
- Loke, M. H. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies - A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. Malásia. 63p. Guia Prático.
- Taylor, R. W.; Flemming, A. H. (1988), Characterizing Jointed Systems by Azimuthal Resistivity Surveys. *Ground Water*, v.26, nº 4. 464–474.
- Watson K. A.; Barker, R. D. (2010). Tank modeling of azimuthal resistivity surveys over anisotropic bedrock with dipping overburden. *Near Surface Geophysics*, Vol.8, p. 297-309.
- Wishart, D. N.; Slater, L. D.; Gates, A. E. (2006). Self potential improves characterization of hydraulically -

active fractures from azimuthal geoelectrical measurements. *Geophysical Research Letters*. Vol. 33, L17314.