Dissertação de Mestrado

**LEVANTAMENTOS GEOELÉTRICOS AZIMUTAIS EM
MODELOS REDUZIDOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE
MACIÇOS FRATURADOS**

SIMONE SIMIM MOREIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar (UFOP)

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO – OUTUBRO DE 2016

M8381 Moreira, Simone Aparecida Simim.
Levantamentos geoeletricos azimutais em modelos reduzidos para
caracterização de Maciços Fraturados [manuscrito] / Simone Aparecida Simim
Moreira. - 2016.
168f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de
Geotecnia. Escola de Minas. Geotecnia.
Área de Concentração: Engenharia Geotécnica.

1. Geofísica - Métodos Geoeletricos. 2. Eletroresistividade. 3. Anisotropia.
4. Levantamento Azimutal. 5. Modelos reduzidos. I. Bacellar, Luís de Almeida
Prado . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.13

Catálogo: www.sisbin.ufop.br

LEVANTAMENTOS GEOELÉTRICOS AZIMUTAIS EM MODELOS REDUZIDOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS FRATURADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 12 de dezembro de 2016, pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar (Orientador – UFOP)

Prof^a. Dr^a. Maria Silvia Carvalho Barbosa (UFOP)

Prof. Dr. Otávio Coaracy Brasil Gandolfo (IPT/SP)

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus,
não sou o que era antes”.*
(Marthin Luther King)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter iluminado meu caminho e pensamentos e por me conceder saúde e sabedoria para a realização desta pesquisa.

Ao professor Bacellar pela oportunidade, paciência, aprendizado, respeito e compreensão.

Aos meus pais por sempre criarem caminhos e me incentivarem a ir atrás dos meus sonhos, me lembrando sempre de nunca me esquecer da bondade e da humildade.

A todos os professores, funcionários e colegas do NUGEO, em especial a Bárbara, Luma e Peterson, pelo companheirismo constante durante todos os momentos de desenvolvimento deste trabalho, pelas longas conversas e horas de estudo.

À FAPEMIG, CAPES, UFOP e NUGEO, pelo auxílio financeiro e por disponibilizarem todos os recursos necessários para a elaboração deste trabalho.

A todos aqueles que dedicaram seu tempo a conversar, discutir e dar opiniões sobre os temas abordados neste trabalho.

RESUMO

A análise de descontinuidades é cada vez mais comum quando se necessita caracterizar de maneira mais precisa os maciços rochosos. Em geotecnia, essa caracterização é importante para avaliar a qualidade geomecânica e anisotrópica de maciços usados para fundações, ombreiras de barragens, túneis, taludes, entre outros. Sendo assim, novas técnicas de aquisição de dados e interpretação das condições dos maciços devem ser desenvolvidas e otimizadas. Com isso, o uso da eletrorresistividade azimutal se torna uma ferramenta muito útil para aquisição de dados, pois é um método efetivo, de baixo custo e pouco invasivo, além de ser bastante eficaz na caracterização de anisotropias elétricas condicionadas por descontinuidades. Por conseguinte, pretende-se nesse trabalho utilizar configurações distintas de eletrodos em modelo reduzido de laboratório, usando a técnica azimutal para avaliar a precisão e acurácia dos mesmos. Os experimentos foram conduzidos em maciço rochoso formado pela junção de placas de mármore, com uma família de descontinuidades com aberturas distintas. O levantamento azimutal foi feito empregando os arranjos Wenner, Schlumberger, Dipolo-dipolo Equatorial e Quadrático. Foram realizadas quatro etapas, sendo na primeira simulada uma descontinuidade central de 0,5 mm completamente preenchida por areia e outras formadas pelo encontro das placas de mármore e sobre o maciço colocou-se 1,8 cm de areia saturada. Na segunda e na terceira usou-se a mesma configuração de descontinuidades, porém com uma cobertura de areia saturada de 5 cm e 8 cm, respectivamente. Na quarta etapa, distribuíram-se descontinuidades de 5 mm preenchidas por areia por todo o modelo e adicionou-se 5 cm de areia acima. Variaram-se os espaçamentos dos eletrodos afim de investigar porções do maciço mais profundas. Foi possível avaliar a anisotropia elétrica do modelo, qual arranjo é mais sensível a esse parâmetro, assim como a resistividade aparente média e as profundidades de investigação atingidas. Ao fim, concluiu-se que o arranjo Wenner atendeu melhor aos objetivos propostos inicialmente no trabalho.

PALAVRAS CHAVE: Descontinuidades, Eletrorresistividade, Modelo Reduzido, Maciço Rochoso, Levantamento Azimutal, Anisotropia elétrica.

ABSTRACT

The discontinuities analysis is increasingly common when you need to characterize more precisely a rock. In geotechnics, this characterization is important to evaluate the geomechanics quality and anisotropic of the rock used, such as foundations, abutments of dams, tunnels, embankments, among others. Therefore, new data acquisition techniques and interpretation of the conditions of rock must be developed and optimized. Thus, the use of azimuthal resistivity becomes a very useful tool for data acquisition, it is an effective method, low cost and less invasive, and is quite effective in characterizing electrical anisotropy conditioned by discontinuities. Therefore, it is intended in this search using different configurations of electrodes in laboratory model using the azimuthal technique for evaluating the precision and accuracy. The experiments were conducted in rock formed by the junction of slabs of marble, with a family of discontinuities with different openings. The azimuth survey was conducted using the Wenner, Schlumberger, Dipole-dipole Equatorial and Quadratic. Four steps were performed, and the first simulated a central discontinuity of 0.5 mm completely filled with sand and others formed by the meeting of marble plates and on the rock was placed 1.8 cm of saturated sand. In the second and the third used to discontinuities same configuration, but with a saturated sand cover the rock 5 cm and 8 cm, respectively. In the fourth stage, distributed to 5 mm discontinuities filled with sand around the pattern and added of 5 cm the sand above the model. They varied the spacing of the electrodes in order to investigate the deeper rock portions. It was possible to evaluate the electrical anisotropy of the model, which arrangement is more sensitive to this parameter, and the average apparent resistivity and the affected investigation depths. In the end, it was concluded that the Wenner attended better than initially proposed objectives.

KEYWORDS: discontinuities, Reduced Model, Massive Rocky, Azimuth Survey, electrical anisotropy.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

Figura 2.1: Principais técnicas de investigação geoeétrica (Braga, 2007).	9
Figura 2.2: Fundamentos da Lei de Ohm (Braga, 2007).	11
Figura 2.3: Injeção de corrente e as superfícies equipotenciais (Cavalcanti, 2013).	12
Figura 2.4: Subsuperfície heterogênea e anisotrópica com as respectivas resistividades (modificado Orellana, 1972).	13
Figura 2.5: Configuração simplificada do arranjo Wenner com diferentes espaçamentos entre os eletrodos (Gandolfo, 2007).	17
Figura 2.6: Esquema para o arranjo Wenner com as configurações alfa, beta e gama (Gandolfo, 2007).	17
Figura 2.7: Esquema do arranjo Schlumberger (Galdolfo, 2007).	18
Figura 2.8: Relação dos três quadrados e as posições dos eletrodos no arranjo Quadrático (Lane <i>et al.</i> , 1995).	19
Figura 2.9: Configuração Dipolo-dipolo com o sentido do caminhamento (Gandolfo, 2007).	21
Figura 2.10: Configuração do arranjo Dipolo-dipolo equatorial (DDE) (Loke, 1999).	22
Figura 2.11: Dispositivo de multi-canal de eletrodos e equipamentos de aquisição de dados (Fachin, 2012).	23
Figura 2.12: Geometria, em planta, de um levantamento azimutal de resistividade e potencial espontâneo (modificado Wishart <i>et al.</i> , 2006).	28
Figura 2.13: Esquema de um maciço fraturado submetido a um levantamento azimutal (modificado de Taylor e Fleming, 1988).	30
Figura 2.14: Elipse teórica de resistividade aparente para arranjo azimutal colinear (Taylor e Fleming, 1988).	31
Figura 2.15: Paradoxo de anisotropia segundo Boris (2005).	33
Figura 2.16: Em A, tem-se a elipse tipo A. Em B, nota-se a elipse tipo B (Taylor e Fleming, 1988).	34
Figura 2.17: Elipse tipo C de Taylor e Fleming (1988).	35

Figura 2.18: Em (1) geometria das discontinuidades e a elipse A resultante dessa configuração. Em (2) e (3) geometria e elipses tipo B e C, respectivamente (Taylor e Fleming, 1988).....	36
Figura 2.19: Representação esquemática tanque experimental do modelo de Wishart <i>et al.</i> (2006).....	38
Figura 2.20: Representação esquemática do tanque experimental de Watson e Barker (modificado de Watson e Barker, 2010).....	40
Figura 2.21: Tanque de Watson e Barker, vista de planta com seus respectivos componentes (modificado de Watson e Barker, 2010).....	41
Figura 2.22: Tanque de Watson e Barker, com todos os componentes. Vista e perfil (modificado de Watson e Barker, 2010).....	41
Figura 2.23: Relação espaçamento de eletrodos (a) /profundidade de água e a resistividade aparente (modificado de Watson e Barker, 2010).	42
Figura 2.24: Curvas de R_{D1} e R_{D2} para a simulação da interface inclinada. De cinza tem-se R_{D1} e de preto R_{D2} (modificado de Watson e Barker, 2010).....	43
Figura 2.25: Três combinações do modelo de anisotropia e interface de mergulho (modificado de Watson e Barker, 2010).....	44
Figura 2.26: Elipse e gráfico cartesiano para a condição de placas e mergulho paralelos entre si, placas e interface de mergulho a 45 ° e perpendiculares entre si (modificado de Watson e Barker, 2010).	45

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 3.1: Tanque de acrílico preenchido com água para verificar a resistência e estanqueidade.....	46
Figura 3.2: Cantoneira utilizada para reforço das laterais do tanque e todo o aparato de reforço, com ênfase nas cintas resistentes.	47
Figura 3.3: Placa de mármore utilizada na construção do maciço fraturado. Montagem do modelo em planta, no interior do tanque de acrílico.....	48
Figura 3.4: Aparato artesanal usado no controle da saturação.	49
Figura 3.5: Plataforma de eletrodos construída em placas de PVC.Detalhe para os blocos de isopor na base da placa de PVC.....	50

Figura 3.6: Esquema da estrutura do tanque usado no experimento em planta e perfil.	51
Figura 3.7: Viga central de madeira e transferidor de ângulos, indicados pela seta vermelha, haste de plástico.	52
Figura 3.8: Resistivímetro da marca Auto Energia, modelo X5, multímetro digital ET2042D da Minipa, bateria, eletrodos de aço utilizados nas medições.	53
Figura 3.9: Modelo reduzido com uma descontinuidades central de 5 mm. Modelo utilizado na etapa 4, com descontinuidades de 5 mm distribuídas por todo maciço	54
Figura 3.10: Disposição do arranjo Wenner no levantamento eletrorresistivo azimuthal.	55
Figura 3.11: Disposição do arranjo Dipolo-dipolo equatorial no levantamento eletrorresistivo azimuthal.	56
Figura 3.12: Disposição do arranjo Quadrático no levantamento eletrorresistivo azimuthal.	57
Figura 3.13: Disposição do arranjo Schlumberger no levantamento eletrorresistivo azimuthal.	57
Figura 3.14: Esquema, em planta, do caminhamento elétrico com arranjo Dipolo-dipolo e os respectivos perfis levantados. Linhas vermelhas representam a direção das descontinuidades.	58
Figura 3.15: Linhas do levantamento Dipolo-dipolo. Configuração do levantamento eletrorresistivo Dipolo-dipolo.	59
Figura 3.16: Levantamento da eletrorresistividade da areia pelo arranjo Wenner.	60
Figura 3.17: Ensaio para medir a resistividade das placas de mármore.	61
Figura 3.18: Multiparâmetro utilizado para determinar condutividade elétrica da água e amostra da água coletada.	61

CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Figura 4.1: Curva granulométrica resultado do ensaio de granulometria realizado na areia utilizada no experimento, segundo NBR 7181/1984.	63
Figura 4.2: Seção de pseudo-resistividade aparente no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 1. Espaçamentos entre eletrodos de 4 cm e 6 cm.	66

Figura 4.3: Seção de pseudo-resistividade aparente no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 2. Espaçamentos entre eletrodos de 4 cm e 6 cm.	66
Figura 4.4: Seção de pseudo-resistividade aparente no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 3. Em A espaçamento entre eletrodos de 4 cm e em B, de 6 cm.....	67
Figura 4.5: Seção de pseudo-resistividade aparente no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 4. Espaçamentos entre eletrodos de 4 cm e em B, de 6 cm.....	67
Figura 4.6: Curvas de resistividade aparente <i>versus</i> azimutes para o arranjo Wenner, usando quatro espaçamentos distintos (em cm), etapa 1.	69
Figura 4.7: Elipses de resistividade aparente, escala de menor detalhe, para o arranjo Wenner, para espaçamentos entre eletrodos de 4 cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm.....	70
Figura 4.8: Elipses de resistividade aparente, escala de maior detalhe, para o arranjo Wenner, para espaçamentos entre eletrodos de 4 cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm.....	71
Figura 4.9: Curvas de resistividade aparente <i>versus</i> azimutes para o arranjo Quadrático, usando quatro espaçamentos a de 4, 6, 8 e 10 cm, etapa 1.....	72
Figura 4.10: Elipses de resistividade aparente, escala de menor detalhe para o arranjo Quadrático, espaçamentos entre eletrodos de 4cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm.....	73
Figura 4.11: Elipses de resistividade aparente, escala de maior detalhe para o arranjo Quadrático, espaçamentos entre eletrodos de 4cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm	74
Figura 4.12: Curvas de resistividade aparente <i>versus</i> azimutes para o arranjo DDE, para três espaçamentos (2, 3 e 4 cm), etapa 1.....	75
Figura 4.13: Elipses de resistividade aparente, menor escala, para o arranjo DDE. Em Elipses para os espaçamentos de 2 cm, 3 cm e 4 cm	76
Figura 4.14: Elipses de resistividade aparente, escala de maior detalhe, para o arranjo DDE. Elipses para os espaçamento de 2 cm, 3 cm e 4 cm	76
Figura 4.15: Curvas de resistividade aparente <i>versus</i> azimutes para o arranjo Schlumberger na etapa 1.....	77
Figura 4.16: Em A, elipse de resistividade aparente em escala de menor detalhe e em B, elipse de resistividade aparente na escala de maior detalhe.	77
Figura 4.17: Curvas de resistividade aparente <i>versus</i> azimutes para o arranjo Wenner, usando quatro espaçamentos de 4, 6, 8 e 10 cm, etapa 2.....	78
Figura 4.18: Elipses de resistividade aparente, escala de menor detalhe, para o arranjo Wenner, para espaçamentos entre eletrodos de 4cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm. Etapa 2.....	79

Figura 4.19: Elipses de resistividade aparente, escala de maior detalhe, para o arranjo Wenner, para espaçamentos entre eletrodos de 4 cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm. Etapa 2.....	80
Figura 4.20: Curvas de resistividade aparente <i>versus</i> azimutes para o arranjo Quadrático, usando quatro espaçamentos distintos, etapa 2.....	81
Figura 4.21: Elipses para os espaçamentos de 4 cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm. Ambos arranjo Quadrático. Escala de menor detalhe. Etapa 2.	82
Figura 4.22: Elipses para os espaçamentos de 4 cm, 6cm, 8 cm e 10 cm. Arranjo Quadrático na escala de maior detalhe. Etapa 2.	83
Figura 4.23: Curvas de resistividade aparente <i>versus</i> azimutes para o arranjo DDE para os três espaçamentos entre eletrodos utilizados.....	84
Figura 4.24: Elipses de resistividade aparente para os espaçamentos de 2 cm, 3 cm e 4 cm. Escala de menor detalhe. Etapa 2.	85
Figura 4.25: Elipses de resistividade aparente para os espaçamentos de 2 cm, 3 cm e 4 cm. Ambos arranjo DDE. Escala de maior detalhe. Etapa 2.	85
Figura 4.26: Curva resistividade aparente <i>versus</i> azimuth para o arranjo Schlumberger, etapa 2.....	86
Figura 4.27: Elipses de resistividade aparente para o arranjo Schlumberger. Elipses em escala menor e maior detalhe. Etapa 2.....	87
Figura 4.28: Curvas de resistividade aparente <i>versus</i> azimutes para o arranjo Wenner, usando quatro espaçamentos de 4, 6, 8 e 10 cm, etapa 3.....	88
Figura 4.29: Elipses de resistividade aparente para os quatro espaçamento usados no arranjo Wenner, etapa 3. Escala de pequeno detalhe. Etapa 3.....	89
Figura 4.30: Elipses de resistividade aparente para o espaçamento de 4 cm, 6 cm, 8 cm, e 10 cm. Escala de maior detalhe. Etapa 3.....	90
Figura 4.31: Curvas de resistividade aparente <i>versus</i> azimutes para o arranjo Quadrático, usando quatro espaçamentos distintos, etapa 3.....	91
Figura 4.32: Elipses para os espaçamentos de 4 cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm. Levantamento da etapa 3 usando o arranjo Quadrático. Escala de menor detalhe.....	92
Figura 4.33: Elipses para os espaçamentos de 4 cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm, respectivamente. Escala de maior detalhe.	93
Figura 4.34: Curvas de resistividade aparente <i>versus</i> azimutes para o arranjo DDE, etapa 3.....	94

Figura 4.35: Elipses de resistividade aparente para o DDE, etapa 3. Escala de menor detalhe. Etapa 3.....	94
Figura 4.36: Elipses de resistividade aparente para o DDE, etapa 3. Escala de maior detalhe. Etapa 3.....	95
Figura 4.37: Curva de resistividade aparente versus azimuth. Arranjo Schlumberger, etapa 3.....	96
Figura 4.38: Elipses de resistividade aparente para o arranjo Schlumberger, etapa 3. .	96
Figura 4.39: Resistividade aparente <i>versus</i> azimuthes para o arranjo Wenner, usando quatro espaçamentos de 4, 6, 8 e 10 cm, etapa 4.	97
Figura 4.40: Elipses de resistividade aparente para o arranjo Wenner e espaçamentos de 4cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm. Escala de pequeno detalhe.....	98
Figura 4.41: Escala de maior detalhe para as elipses de resistividade aparente para o arranjo Wenner e espaçamentos de 4, 6, 8 e 10 centímetros, respectivamente. Etapa 4.	99
Figura 4.42: Curvas de resistividade aparente <i>versus</i> azimuthes para o arranjo Quadrático. Dados da etapa 4. Espaçamentos de 4, 6, 8 e 10 cm.	100
Figura 4.43: Elipses de resistividade aparente, escala de pequeno detalhe, para o arranjo Quadrático. Elipses para os espaçamentos de 4 cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm.	100
Figura 4.44: Elipses de resistividade aparente, escala de maior detalhe, para o arranjo Quadrático, espaçamentos de 4 cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm.	101
Figura 4.45: Curvas de resistividade aparente <i>versus</i> azimuthes para o arranjo DDE. Três espaçamentos distintos. Dados da etapa 4.	102
Figura 4.46: Elipses de resistividade aparente para o arranjo DDE. Escala de pequeno detalhe.....	102
Figura 4.47: Elipses de resistividade aparente para o arranjo DDE. Escala de maior detalhe.....	103
Figura 4.48: Curva de resistividade aparente X azimuth para o arranjo Schlumberger, etapa 4.....	103
Figura 4.49: Elipses de resistividade aparente para o arranjo Schlumberger, etapa 4.	104

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

Tabela 2.1: Valores da resistividade de algumas rochas e solos (Loke, 1999).	15
Tabela 2.2: Relação dos arranjos com a profundidade de investigação de acordo com o espaçamento de MN e tamanho total do arranjo (modificado Loke, 1999).	25
Tabela 2.3: Aplicação dos principais métodos geoeletricos. Notar a eficácia da resistividade. (modificado Braga, 2007).	26

CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Tabela 4.1: Profundidades médias de investigação para os arranjos usados em função do comprimento (L) ou espaçamento inter-eletrodo (a).	64
Tabela 4.2: Deslocamento do eixo nas elipses para as quatro etapas estudadas.	105
Tabela 4.3: Coeficientes de anisotropia para todos os arranjo e etapas.	107
Tabela 4.4: Anisotropia calculada segundo conceito de Boris (2005)	108
Tabela 4.5: Resistividades aparente médias para todas as etapas estudadas.	108

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

a -espaçamento entre os eletrodos

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC-corrente alternada

ARS-eletrorresistividade azimutal

ASP-potencial espontâneo azimutal

CE - caminhamento elétrico

DDE-Dipolo dipole equatorial

IP- polarização induzida

HCl-ácido clorídrico

NBR-norma Brasileira

NUGEO -Núcleo de Geotecnia

RMR - Rock Mass Rating

RQD- Rock Quality Designation

SEV - sondagem elétrica vertical

SP -Potencial espontâneo

σ -condutividade elétrica

Ω -Ohm

ΔV -diferença de potencial

ρ - resistividade

ρ_a - resistividade aparente

ρ_l -resistividade longitudinal

ρ_m -resistividade média

ρ_t -resistividade transversal

λ -coeficiente de anisotropia

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Natureza do problema e justificativa	2
1.3	Objetivos	2
1.4	Estrutura da Dissertação	3

CAPÍTULO 2

2	REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1	Maçãos rochosos fraturados em geotecnia	5
2.2	Métodos geoeletricos	6
2.3	Método da eletrorresistividade	10
2.3.1	Embasamento físico da resistividade elétrica	11
2.3.2	O conceito da resistividade aparente	12
2.3.3	Propriedade elétricas dos materiais geológicos	14
2.3.4	Configurações dos arranjos de eletrodos	15
2.3.4.1	Arranjo Wenner	16
2.3.4.2	Arranjo Schlumberger	18
2.3.4.3	Arranjo Quadrático	19
2.3.4.4	Arranjo Dipolo-dipolo	20
2.3.4.5	Arranjo Dipolo-dipolo equatorial (DDE)	21
2.3.5	Equipamentos usados em levantamentos eletrorresistivos	22
2.3.6	Profundidades de investigação	23
2.4	Aplicação de métodos geoeletricos em geotecnia	25

2.5	A técnica de levantamento azimutal	27
2.6	O paradoxo da anisotropia	32
2.7	Elipses de resistividade aparente.....	33
2.8	Modelos físicos reduzidos de maciços rochosos.....	36
2.8.1	Modelo de Wishart <i>et al.</i> (2006).....	37
2.8.2	Modelo de Watson e Barker	39

CAPÍTULO 3

3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	Preparação do tanque	46
3.2	Construção do maciço fraturado	47
3.3	Construção do suporte de eletrodos	49
3.4	Execução dos ensaios de eletrorresistividade	52
3.4.1	Arranjo Wenner	55
3.4.2	Arranjo Dipolo-dipolo equatorial	55
3.4.3	Arranjo Quadrático	56
3.4.4	Arranjo Schlumberger.....	57
3.4.5	Arranjo Dipolo-dipolo	58
3.5	Caracterização dos materiais empregados	59
3.5.1	Caracterização da areia	59
3.5.2	Caracterização da rocha	60
3.5.3	Caracterização da condutividade elétrica da água	61

CAPÍTULO 4

4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	63
4.1	Apresentação dos resultados	63

4.1.1	Análise dos materiais empregados.....	63
4.1.2	Profundidades médias de investigação	64
4.1.3	Levantamentos com arranjo Dipolo-dipolo	65
4.1.4	Levantamentos eletorresistivos azimutais	68
4.1.5	Etapa 1	68
4.1.5.1	Arranjo Wenner	68
4.1.5.2	Arranjo Quadrático.....	71
4.1.5.3	Arranjo Dipolo-dipolo equatorial.....	74
4.1.5.4	Arranjo Schlumberger	76
4.1.6	Etapa 2	78
4.1.6.1	Arranjo Wenner	78
4.1.6.2	Arranjo Quadrático.....	80
4.1.6.3	Arranjo Dipolo-dipolo equatorial.....	83
4.1.6.4	Arranjo Schlumberger	85
4.1.7	Etapa 3	87
4.1.7.1	Arranjo Wenner	87
4.1.7.2	Arranjo Quadrático.....	90
4.1.7.3	Arranjo Dipolo-dipolo equatorial.....	93
4.1.7.4	Arranjo Schlumberger	95
4.1.8	Etapa 4	96
4.1.8.1	Arranjo Wenner	97
4.1.8.2	Arranjo Quadrático.....	99
4.1.8.3	Arranjo Dipolo-dipolo equatorial.....	101
4.1.8.4	Arranjo Schlumberger	103
4.1.9	Deslocamento das elipses	104
4.1.10	Coeficiente de anisotropia e resistividade aparente média	106
4.1.11	Discussão dos resultados.....	109

CAPÍTULO 5

5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	111
5.1	Conclusões	111

5.2 Sugestões:.....	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
ANEXOS	I

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Em geotecnia, é de suma importância caracterizar os maciços rochosos para evitar problemas diversos de instabilidade geotécnica. Pode-se enumerar vários deles, como por exemplo, a percolação excessiva de água em um maciço rochoso muito fraturado destinado a obras, como túneis, fundações, barragens e taludes. Nesse sentido, conhecer as características dos maciços, como a geometria, a distribuição espacial, a anisotropia e condutividade hidráulica das descontinuidades, é essencial para otimizar e aprimorar seu uso e ocupação.

Os métodos geofísicos elétricos são correntemente empregados para caracterizar descontinuidades, sendo assim nesse trabalho pretende-se avaliar técnicas alternativas de aquisição de dados e de interpretações dos parâmetros. Para tanto, a opção recaiu para os levantamentos geoeletricos azimutais, que consistem em adquirir dados de eletrorresistividade, utilizando arranjos de eletrodos pré-definidos, fixados num ponto central da superfície e posteriormente girá-los em diversos azimutes. Estes métodos são considerados de mais rápida aquisição e mais eficazes para caracterização de anisotropias elétricas condicionadas por descontinuidades. Contudo, como há muita controvérsia na literatura sobre as vantagens e desvantagens de cada arranjo, optou-se por avaliá-los inicialmente em condições controladas, em modelo reduzido de laboratório para posteriormente testá-las em campo.

Além das condições controladas, os modelos reduzidos permitem avaliar e simular diversas situações. Diversos autores como Wishart *et al.* (2006) e Watson e Barker (2010) realizaram levantamentos azimutais em modelos reduzidos de maciços rochosos para avaliar as características de descontinuidades, a influência da cobertura de solo sobre o mesmo, usando arranjos de eletrodos distintos.

Esse procedimento, apesar de ainda pouco usado em geotecnia, pode ser extremamente útil para avaliar o comportamento geomecânico dos maciços rochosos fraturados.

Portanto o objetivo central dessa pesquisa é examinar o desempenho da técnica azimutal.

Todas as etapas da pesquisa foram realizadas nos laboratórios de Hidrogeotecnia e Caracterização de Solos do Núcleo de Geotecnia (NUGEO) da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

1.2 Natureza do problema e justificativa

Em obras geotécnicas é comum encontrar situações inesperadas de percolação de fluidos em descontinuidades em maciços rochosos. Portanto, antes que os empreendimentos geotécnicos sejam iniciados, deve-se realizar investigações minuciosas e criteriosas nos maciços, para que assim possa se realizar intervenções, afim de evitar futuros problemas de instabilidade geotécnica, como percolação excessiva, tensões indesejadas e problemas de instabilidade.

Além disso, obras geotécnicas já existentes também exigem um monitoramento regular de suas estruturas para avaliar possíveis pontos de percolação de fluidos que possam ser danosos à segurança do empreendimento. Como em muitos casos o maciço está localizado em subsuperfície, a investigação se torna mais dispendiosa e complexa, exigindo procedimentos mais eficientes e seguros.

Sendo assim, a confecção de modelos reduzidos em laboratório e a posterior realização de ensaios específicos trará respostas sobre a eficácia da técnica eletrorresistiva azimutal, podendo esses posteriormente, ser aplicada em escalas reais (barragens, túneis, taludes, fundações) para atestar, através da anisotropia elétrica, a anisotropia do maciço.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi analisar, em modelos reduzidos de laboratório, a adequabilidade dos levantamentos geoeletricos azimutais para caracterizar descontinuidades em maciços rochosos cobertos por camada de solo saturado. Toda

técnica empregada visa fundamentalmente encontrar no modelo reduzido o arranjo que forneça o resultado mais confiável e preciso para, posteriormente ser aplicada em situações geotécnicas diversas.

Como objetivos secundários, pretende-se:

- avaliar diferentes tipos de arranjos de eletrodos no levantamento eletrorresistivo azimutal, alguns poucos conhecidos, como o Quadrático;
- simular a influência da variação da espessura da cobertura de solo saturado nos resultados;
- - avaliar se é possível empregar, em trabalhos expeditos, eletrodos polarizáveis em levantamentos com resistivímetros de corrente contínua.

1.4 Estrutura da Dissertação

Para facilitar a leitura e compreensão desta dissertação, os capítulos foram dispostos e elaborados segundo uma sequência lógica de ideias. Foi dividida em 5 capítulos, referências bibliográficas e anexos com a seguinte formatação:

- Capítulo 1: Contém uma breve apresentação do trabalho, englobando os principais aspectos de maciços fraturados e sua relação com a geotecnia, assim como uma breve apresentação do uso de métodos geoeletricos para a investigação das condições de descontinuidades em subsuperfície. Além disso, foi apresentada a natureza do problema, os objetivos e a justificativa para a realização desta pesquisa;
- Capítulo 2: Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre maciços rochosos fraturados, abordando suas principais características, métodos de investigação e importância em geotecnia. Posteriormente descreveram-se os métodos geoeletricos com ênfase para eletrorresistividade. Foi realizada também uma pesquisa dos trabalhos presentes na literatura à cerca do uso de levantamentos azimutais e dos modelos físicos reduzidos em laboratório. Para complementar, apresentou-se uma pesquisa sobre as principais aplicações desse método em diversas obras geotécnicas;

- Capítulo 3: Descreveram-se os materiais e métodos usados na execução das modelagens, utilizando o método da eletrorresistividade azimutal, com respectivos arranjos empregados. Mostrou-se todo o procedimento em laboratório, desde a montagem do experimento (tanque + maciço) até a execução dos ensaios e coleta de dados;
- Capítulo 4: Aborda a análise e discussão de todos os resultados alcançados nessa pesquisa;
- Capítulo 5: Aborda a conclusão do trabalho, assim como sugestões para pesquisas futuras;
- Referência bibliográfica: Apresenta todas as referências bibliográficas utilizadas durante a pesquisa.
- Anexos: Apresentam Tabelas e gráficos usados e desenvolvidos durante todo o trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Maciços rochosos fraturados em geotecnia

De maneira geral, maciços rochosos são materiais heterogêneos, porosos, quase sempre descontínuos, compostos por um conjunto de grãos, que formam o arcabouço sólido. (Azevedo, 2005). Segundo a norma técnica brasileira 6502 (ABNT 6502, 1995), um maciço rochoso pode ser definido pelo conjunto rocha intacta + descontinuidades.

Para a geotecnia, um maciço rochoso fraturado pode ser definido como um meio em que as propriedades dominantes, em termos hidráulicos, estão relacionadas à presença de descontinuidades (Oliveira, 1981). Entende-se por descontinuidade, nesse caso, feições planares de todas as naturezas, como juntas, diáclases, contatos entre litologias distintas, fraturas, falhas, fissuras, dentre outros, que apresentam reduzida qualidade mecânica (Oliveira e Brito, 1998).

A não homogeneidade das estruturas rochosas pode conferir anisotropia ao maciço rochoso (Azevedo, 2005), que pode ser definida como uma característica que o material possui de variar alguma de suas propriedades físicas em função da direção. Para Taylor e Flemming (1988), uma rocha é dita eletricamente anisotrópica se o valor da resistividade aparente medida varia com a direção. A anisotropia elétrica é de substancial importância na geotecnia, uma vez que a medição dessa propriedade pode ser usada para avaliar a qualidade geomecânica e condutividade hidráulica de um maciço rochoso (Oliveira e Brito, 1998).

Para atestar a qualidade geomecânica de um maciço rochoso pode-se utilizar diversas classificações geomecânicas, tais como o sistema RMR (*Rock Mass Rating*) proposto por Bieniawski (1989), que se baseia em cinco classes, utilizando seis parâmetros específicos para a classificação (Oliveira e Brito, 1998). Outra classificação também usada é o Sistema Q, proposto por Barton *et al.* (1974), para determinar as características do maciço e indicar tratamentos de suportes do mesmo, utilizando alguns parâmetros como o RQD, índices de número de famílias de descontinuidades,

rugosidade das suas paredes, ação da água subterrânea e estado de tensão do maciço (Lopes, 2015).

Em maciços rochosos a percolação de água se dá através de suas descontinuidades. Características como a condutividades hidráulica e a permeabilidade de uma rocha estão intimamente ligadas as descontinuidades e suas características. Quando a rocha se encontra muito fraturada, pode-se dizer que ela se comporta como um solo poroso, devido ao alto grau de conectividade gerado por esse fenômeno (Lopes, 2015). Além disso, o comportamento hidráulico de um maciço rochoso está relacionado à combinação do comportamento do sistema de descontinuidades. Na escala do maciço, os parâmetros hidráulicos fundamentais são o espaçamento entre as descontinuidades, a continuidade e a orientação de cada conjunto (Oliveira, 1981).

As descontinuidades em um meio rochoso podem ser investigadas de diversas maneiras, como por exemplo, fazendo uso de sondagens, ensaios *in situ*, como os de perda d'água e infiltração, levantamentos estruturais para avaliar a orientação das descontinuidades, e levantamentos geofísicos. Os métodos geoeletricos se mostram uma excelente opção para investigar as descontinuidades, a anisotropia e condições de condutividade hidráulica de maciços rochosos e por essa razão, optou-se por desenvolver nessa pesquisa, uma metodologia utilizando os métodos geoeletricos, mais especificamente a eletroresistividade.

2.2 Métodos geoeletricos

De acordo com Orellana (1972), entende-se por geofísica a ciência que estuda as estruturas do interior da Terra através do contraste das propriedades físicas de um material, utilizando metodologias tomadas na superfície da mesma. Exemplos de métodos geofísicos são magnetometria, gravimetria, levantamentos geoeletricos e radiométricos. Nesse contexto, nota-se a importância do uso da geofísica no entendimento das estruturas presentes no interior da Terra e sua relação com componentes que possam estar presentes no sistema.

Uma de suas aplicações abrange o uso de métodos geoeletricos para caracterização de macios rochosos fraturados, localizados em subsuperfície, objetivando entender a relações das descontinuidades presentes. Esses métodos utilizam campos elétricos existentes no interior da Terra ou requerem a introdução no solo de correntes geradas artificialmente (Kearey *et al.*, 2009). A base teórica dos métodos geoeletricos está na determinação das propriedades físicas das estruturas geológicas do meio, juntamente com o contraste que essas características podem resultar (Braga, 2007).

A principal propriedade física investigada por esses métodos é a resistividade elétrica, ou o seu inverso, a condutividade elétrica. É possível assim, por essa metodologia determinar a variação da condutividade elétrica e assim caracterizar o solo ou rocha em subsuperfície. A variação da resistividade elétrica de um macio, se ocorrer, pode estar condicionada à direção de medição do fenômeno, conhecido com anisotropia elétrica (Essein e Ehirim, 2009).

Entende-se por condutividade elétrica (σ) a facilidade de um corpo em conduzir a corrente elétrica. Pode-se dizer que a condutividade é o inverso da resistividade, ou seja, a resistividade é definida como sendo a dificuldade que um corpo apresenta em conduzir a corrente elétrica. Nas rochas e solos, ela pode aparecer de três formas (Telford *et al.*, 1990):

- Condutividade eletrônica: é resultante da movimentação dos elétrons livres presentes nos retículos do material. É comum ocorrer em metais nativos e também em minerais sulfetados e grafita;

- Condutividade eletrolítica: é resultado do movimento dos íons em solução. É comum em rochas fraturadas ou porosas, pois essas tendem a armazenar soluções aquosas em seus poros e descontinuidades, o que aumenta sua condutividade elétrica. Um rocha fraturada irá reter maior quantidade de fluidos em suas descontinuidades do que em uma rocha macia. A grosso modo, a resistividade de uma rocha está condicionada não só a sua condutividade, mas também da condutividade do fluido em suas descontinuidades, assim como a quantidade do mesmo, sugerindo uma relação com a condutividade elétrica do fluido e a porosidade do meio. Porém, outros fatores contribuem para a resistividade elétrica de rochas e solos, como a forma dos espaços

porosos, o grau de saturação em água, a temperatura, presença de argilas e densidade das descontinuidades;

- Condutividade dielétrica: predomina em regime de corrente alternada e é função da permissividade dielétrica do meio.

Deve-se considerar também as técnicas de desenvolvimento para realizar os levantamentos geoeletricos em campo ou laboratório. Entende-se por técnica a maneira como os levantamentos são realizados (Braga, 2007), sendo as principais delas o caminhamento elétrico (CE), sondagem elétrica vertical (SEV) e a perfilagem elétrica (Figura 2.1).

A diferença entre essas técnicas está na disposição dos eletrodos na superfície do terreno ou interior dos furos de sondagem, além da maneira de se desenvolver os trabalhos associados aos objetivos da pesquisa. A sondagem elétrica vertical é usada para estudos onde o interesse é análise de estruturas na interface horizontal ou quase horizontais. Os eletrodos de potencial e a corrente são gradativamente expandidos ao redor de um ponto central fixo, produzindo dados das variações do parâmetro físico estudado com a profundidade. Modificando os espaçamentos entre os eletrodos, as profundidades investigadas também de modificam (Kearey *et al.*, 2009).

No caminhamento elétrico as investigações são feitas através da variação lateral de um parâmetro físico, mantendo-se os instrumentos de injeção de corrente fixo e movendo os eletrodos de potencial lateralmente. Já na perfilagem elétrica as medições são realizadas no interior de furos de sondagens, fornecendo informações sobre as características laterais e verticais do local investigado (Braga, 2007). Além dessas técnicas existem outras como a azimutal, que será melhor detalhada posteriormente.

Figura 2.1: Principais técnicas de investigação geoeletrica (Braga, 2007).

Essas técnicas podem ser usadas com todos os métodos geoeletricos existentes, obedecendo uma lógica de escolha de acordo com o objetivo da pesquisa. O potencial espontâneo (SP), também chamado potencial natural, utiliza o campo de eletricidade natural originário da Terra, baseando-se na medição, em superfície, das diferenças de potencial natural resultantes das reações eletroquímicas e eletrocinéticas, que ocorrem em subsuperfície (Kearey *et al.*, 2009). Segundo Braga (2007), um dos causadores do potencial natural é o potencial de infiltração. Esse consiste na geração do campo elétrico devido ao movimento de eletrólitos em subsuperfície.

Já a polarização induzida é baseada nas medições das variações de voltagem em função do tempo ou frequência, denominados de levantamentos IP no domínio tempo ou frequência, respectivamente (Braga, 2007). Ao se usar um arranjo padrão de resistividade com quatro eletrodos e posteriormente de forma abrupta, desligar a corrente, nota-se que o potencial entre os eletrodos não cai a zero instantaneamente. A voltagem sofre um decaimento gradual, levando alguns segundos para atingir o valor zero.

Sendo assim, o solo ou rocha armazenam carga elétrica em seus poros, tornando-se eletricamente polarizado. A medida do decaimento do potencial em detrimento do tempo é conhecido como IP no domínio tempo (Kearey *et al.*, 2009). Caso passe a se usar para a medição da resistividade uma fonte variável de corrente conhecida como corrente alternada (AC), de baixa frequência, nota-se que a resistividade decai com o aumento da frequência (Kearey *et al.*, 2009). Esse levantamento é conhecido como IP no domínio da frequência.

2.3 Método da eletrorresistividade

Esse método consiste na aplicação, no terreno, de corrente elétrica artificial, contínua ou de frequência muito baixa, com auxílio de eletrodos de corrente e, posteriormente é medida a diferença de potencial, utilizando eletrodos de potencial polarizados, feitos de metal, ou não polarizados. O método mais simples de eletrorresistividade utiliza quatro eletrodos que podem se dispor em arranjos lineares e não-colineares (Kearey *et al.*, 2009).

Conhecendo-se a corrente empregada no subsolo e a diferença de potencial, é possível determinar a resistividade elétrica, que é definida como a dificuldade que a corrente I encontra de se propagar em um determinado meio. Dentre todas as propriedades físicas de rochas e solos, a eletrorresistividade é a que apresenta maior intervalo de variações (Gandolfo, 2007).

A eletrorresistividade é considerada um método acessível, usando-se instrumentação simples, de baixo custo e pode trazer respostas muito efetivas; por essa razão é aplicado em uma gama de áreas, como a hidrogeologia, prospecção de água, mineração e geotecnia (Gandolfo, 2007).

A resistividade elétrica depende da porosidade do material, do grau de saturação e da quantidade de íons dissolvidos no eletrólito. Além disso, dependem em maior ou menor grau, de outras propriedades das rochas e dos solos, como, por exemplo, a pressão, temperatura, conteúdo de argila, grau de cimentação das partículas e tipo de mineralização (Fernandes, 1984).

O método da eletrorresistividade mostra-se bastante satisfatório para caracterizar sequências de camadas rasas ou descontinuidades verticais, que possuem variação de resistividade. Entretanto, o método possui algumas restrições tais como a influência da topografia, efeitos de variações de resistividade devido à cobertura de solo, ambiguidades de interpretações e limitações a configurações estruturais mais simples (Kearey *et al.*, 2009).

2.3.1 Embasamento físico da resistividade elétrica

De acordo com a primeira Lei de Ohm, se um corpo mantém a temperatura constante, a razão entre a tensão entre dois pontos e a corrente elétrica também é constante e esta é denominada resistência elétrica (Orellana, 1972). A segunda lei de Ohm estabelece que a resistência elétrica de um condutor homogêneo e de seção transversal constante é proporcional ao seu comprimento L , inversamente proporcional à sua área transversal S e depende da temperatura do material de que é feito o condutor (Figura 2.2). Essa teoria é expressa pela Equação 2.1:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2.1)$$

onde R , dado em ohm (Ω) pelo Sistema Internacional (SI), é a resistência elétrica e ρ é a resistividade, em ohm.m.

Figura 2.2: Fundamentos da Lei de Ohm (Braga, 2007).

A resistividade ρ é um fator que caracteriza o material e independe de suas dimensões. Sua unidade de medida é o ohm.m, podendo em alguns casos ser expressa em ohm.cm, porém pouco utilizada. De todas as propriedades físicas das rochas, a resistividade é a que possui maior faixa de variação, desde 10^{16} ohm.m (enxofre puro) até $1,6 \times 10^{-8}$ (prata nativa) (Campos, 2004).

Além disso, nos levantamentos eletrorresistivos, quando da injeção da corrente I em uma superfície esférica, esta se propaga radialmente a uma distância r da origem (Cavalcanti, 2013). Considerando-se um semi-espaco homogêneo, as equipotenciais do

potencial elétrico medido são semi-esferas, cuja a área é dada pela expressão $A = 2\pi r^2$. Sendo assim, a densidade de corrente J (Am^{-2}) é dada pela Equação 2.2, onde I é a corrente injetada, o que torna fácil notar que a densidade de corrente diminui com o aumento da distância r (Figura 2.3) (Fachin, 2012; Cavalcanti, 2013).

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.2)$$

Figura 2.3: Injeção de corrente e as superfícies equipotenciais (Cavalcanti, 2013).

2.3.2 O conceito da resistividade aparente

Se considerar a Terra como um sistema homogêneo e isotrópico, todas as medições de eletrorresistividade seriam constantes e assim se poderia denominá-la de resistividade verdadeira. Em levantamentos de eletrorresistividade os parâmetros medidos são a corrente elétrica I , injetada na superfície através de dois eletrodos A e B, e a diferença de potencial ΔV . Se o terreno for homogêneo e isotrópico, a resistividade será constante em qualquer ponto de medição (Campos, 2004).

Sabe-se porém que dificilmente a condição de isotropia e homogeneidade ocorre na superfície da Terra, devido a diferenças estruturais e composicionais que compõem os solos e rochas. Consequentemente, os valores de eletrorresistividade elétrica dos materiais irão variar em cada ponto medido, tanto lateralmente como em profundidade, fazendo com que a resistividade não seja homogênea em todos os pontos. A resistividade medida em superfície será, portanto, um valor “aparente” (Campos, 2004).

De acordo com Orellana (1972), a resistividade não é intrínseca a nenhum material específico, sendo obtida através de expressões válidas para o meio homogêneo. O mesmo autor considera que em um levantamento onde o terreno não é homogêneo e isotrópico e que gera as resistividades ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 e ρ_4 , por exemplo (Figura 2.4), a resistividade medida seria a resultante de todas as resistividades. Ainda segundo Orellana (1972), a resistividade aparente não será somente a resistividade de um ponto, mas sofrerá influência de todas as resistividades medidas, do tipo de arranjo usado no levantamento, assim como a geometria e espaçamento dos eletrodos.

Figura 2.4: Subsuperfície heterogênea e anisotrópica com as respectivas resistividades (modificado Orellana, 1972).

Usando os valores da corrente I e da diferença de potencial ΔV , pode-se calcular a resistividade (ρ) através da Equação 2.3.

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.3)$$

Para se alcançar a resistividade aparente, é fundamental considerar uma expressão para ajustar a Equação 2.3. Como esta é dependente da geometria, espaçamento e tipo de arranjo, define-se o fator geométrico ou fator K , que é dado pela Equação 2.4 (Campos, 2004).

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (2.4)$$

Sendo assim, pode-se expressar a resistividade aparente pela Equação 2.5:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.5)$$

2.3.3 Propriedade elétricas dos materiais geológicos

Os materiais encontrados no meio físico, tais como rochas e solos, apresentam inúmeras propriedades físicas e dentre elas pode-se destacar a resistividade elétrica. Esse parâmetro pode ser influenciado por diversos fatores, como a resistividade dos minerais que formam as rochas e solos, além dos gases e líquidos que preenchem poros desses materiais. Além disso, o grau de saturação, o tamanho e forma das partículas sólidas, que constituem solos e rochas também interferem na resistividade elétrica (Gandolfo, 2007).

Sabe-se que a maior parte dos minerais formadores de rochas e solos não são condutores de eletricidade e realizam esse processo através da passagem de íons nas águas dos poros. Sendo assim, a maior parte das rochas e solos conduzem a eletricidade por processos eletrolíticos, fazendo da porosidade um importante controlador da resistividade das rochas e solos (Kearey *et al.*, 2009). Quanto mais poroso for o meio menor será a resistividade.

Analisando-se as rochas mais comuns que ocorrem na natureza, nota-se que as ígneas e metamórficas exibem valores de resistividade normalmente altos, sofrendo grande influência do grau de fraturamento. Quanto mais descontínua for, menor será a resistividade devido a percolação de fluidos nessas estruturas. A Tabela 2.1 mostra os valores para as principais rochas e solos (Loke, 1999).

Tabela 2.1: Valores da resistividade de algumas rochas e solos (Loke, 1999).

Material	Resistividade (ohm.m)
Rochas ígneas e metamórficas	
Granito	$5,0 \times 10^3$ a $1,0 \times 10^6$
Basalto	$1,0 \times 10^3$ a $1,0 \times 10^6$
Ardósia	$6,0 \times 10^2$ a $4,0 \times 10^7$
Mármore	$1,0 \times 10^2$ a $2,5 \times 10^8$
Quartzito	$1,0 \times 10^2$ a $2,0 \times 10^8$
Rochas sedimentares	
Arenito	$8,0 \times 10$ a $1,0 \times 10^3$
Folhelho	$2,0 \times 10$ a $2,0 \times 10^3$
Calcário	$5,0 \times 10$ a $4,0 \times 10^2$
Solos e água	
Argila	$1,0 \times 10^0$ a $1,0 \times 10^3$
Aluvião	$2,0 \times 10$ a $2,0 \times 10^3$
Água Fresca	$1,0 \times 10$ a $1,0 \times 10^2$
Água do mar	$2,0 \times 10^{-1}$

A Tabela 2.1 mostra grandes faixas de variações entre os valores de resistividade para um mesmo material. Isso ocorre pois uma amostra de rocha ou solo apresenta outros fatores como porosidade, permeabilidade, grau de saturação em água e concentração de sais dissolvidos, que exercem influência considerável no valor final da resistividade. Ao se comparar os valores de resistividade com outras propriedades físicas de solos e rochas, observa-se que esta propriedade possui uma vasta variação (Campos, 2004).

2.3.4 Configurações dos arranjos de eletrodos

Os levantamentos de eletrorresistividade podem ser feitos com um grande número de configurações de arranjos de eletrodos, amplamente reportados pela literatura técnica, porém nessa pesquisa somente cinco deles foram usados: Schlumberger, Wenner, Dipolo-dipolo Equatorial, Quadrático e Dipolo-dipolo. A disposição básica de qualquer configuração de arranjos de eletrodos necessita de pelo menos quatro eletrodos, dois

eletrodos com a função de injetar corrente elétrica no meio, denominados AB, e outros dois, nomeados MN, que medem o potencial gerado.

A escolha do arranjo dependerá do tipo de alvo a ser mapeado, fator este que está relacionado ao padrão de sensibilidade de cada arranjo, para variações horizontais, verticais e laterais. Ainda depende da razão sinal/ruído, sendo sinal os efeitos de interesse e os efeitos indesejáveis são denominados ruídos (Teoford *et al.*, 1990). Outro ponto importante é a profundidade de investigação que se deseja alcançar com o levantamento (Gandolfo, 2007). O sinal para os levantamentos de eletrorresistividade reporta a amplitude da diferença de potencial, recebido pelos eletrodos de potencial de acordo com quantidade de corrente elétrica injetada em subsuperfície.

Para facilitar a compreensão e descrição dos arranjos é adotada uma nomenclatura, onde os espaçamentos entre os eletrodos de corrente e potencial foi chamado de a e o fator de separação entre os eletrodos, geralmente variável, de n (Gandolfo, 2007). À seguir, tem-se descrição dos cinco arranjos de eletrodos contemplados nesta pesquisa.

2.3.4.1 Arranjo Wenner

Este arranjo é tido como um arranjo colinear, pois a disposição dos eletrodos ocupam uma mesma linha (Figura 2.5). Nos levantamentos com a configuração Wenner, os eletrodos de corrente (AB) e os de potencial (MN), que são mantidos a uma mesma separação a , devem ser movidos conjuntamente entre sucessivas leituras (Kearey *et al.*, 2009). A distância na entre os eletrodos AM, MN e NB é sempre mantida constante durante todo o levantamento. Esse tipo de arranjo oferece a melhor resolução vertical das camadas entre todos os outros arranjos (Teixeira, 2013). Uma desvantagem nesse arranjo é a interferência causada por heterogeneidades laterais, pois os eletrodos de corrente e de potencial são expandidos simultaneamente.

Figura 2.5: Configuração simplificada do arranjo Wenner com diferentes espaçamentos entre os eletrodos (Gandolfo, 2007).

De acordo com Gandolfo (2007), esse tipo de arranjo ainda pode sofrer algumas variações, que irão depender das disposições dos eletrodos AB e MN, sendo esses denominados alfa, beta e gama (Figura 2.6), sendo o alfa o mais utilizado. Notar que o arranjo Wenner beta é exatamente o mesmo do primeiro nível de investigação do arranjo Dipolo-dipolo, que será mostrado adiante.

Figura 2.6: Esquema para o arranjo Wenner com as configurações alfa, beta e gama (Gandolfo, 2007).

O fator K , no caso do arranjo Wenner alfa, é dado por $K=2\pi a$, no beta é dado por $6\pi a$ e no gama é dado por $3\pi a$. Consequentemente $K_{\text{beta}} > K_{\text{gama}} > K_{\text{alfa}}$. Essa relação mostra que o arranjo Wenner alfa apresenta a melhor razão sinal/ruído, pois o fator K interfere pouco no valor final da resistividade em relação aos demais. Sendo assim é o mais utilizado no meio técnico (Gandolfo, 2007).

2.3.4.2 Arranjo Schlumberger

A configuração Schlumberger apresenta os eletrodos de potencial (MN) mantidos fixos em relação a um ponto fixo central, enquanto os de correntes (AB), localizados externamente à MN, são movidos de forma crescente em relação ao mesmo ponto central (Figura 2.7) (Kearey *et al.*, 2009). A abertura dos eletrodos de potencial MN deve ser menor ou igual a um quinto da abertura dos eletrodos de corrente, ou seja, $AB/MN \geq 5$.

Figura 2.7: Esquema do arranjo Schlumberger (Galdolfo, 2007).

É um arranjo muito favorável para visualização de camadas horizontais, pois possui uma boa resolução vertical, sendo muito usado em sondagens elétricas verticais (SEV). O arranjo é todo movido em relação a um ponto central fixo, o que faz com que as leituras sejam tomadas enquanto as correntes atingem maiores profundidades (Kearey *et al.*, 2009).

Uma desvantagem desse arranjo é a vulnerabilidade a erros na medida do gradiente de potencial, pois os valores se tornam muito pequenos quando vai se afastando os eletrodos de corrente. Para o arranjo Schlumberger, a constante geométrica K é dada pela Equação 2.6, segundo Braga (2007).

$$K=\pi \left(\frac{AM \cdot AN}{MN} \right) \quad (2.6)$$

2.3.4.3 Arranjo Quadrático

A configuração do arranjo Quadrático consiste em dispor os quatro eletrodos, nos vértices de um quadrado, com aresta a . São realizados três conjuntos de medidas, totalizando três quadrados. Para cada quadrado são realizadas três medições: duas medições com AB perpendiculares, chamadas de alfa (α) e beta (β), e a terceira, diagonal, gama (γ) (Figura 2.8) (Lane *et al.*, 1995). Este quadrado deve ser rotacionado de forma a se obter medidas em vários azimutes.

Figura 2.8: Relação dos três quadrados e as posições dos eletrodos no arranjo Quadrático (Lane *et al.*, 1995).

As medidas de α e β fornecem informações sobre a variação direcional da resistividade aparente (ρ_a) em subsuperfície. Já as medidas de γ servem para verificar a acurácia das medições de α e β (Lane *et al.*, 1995). Segundo os mesmos autores, se o meio é isotrópico, a resistividade aparente na direção alfa é igual a resistividade aparente (ρ_a) na direção beta e portanto, a resistividade na direção gama é igual a zero;

$$\rho_{a\alpha} = \rho_{a\beta} \quad \rho_{a\gamma} = 0.$$

Entretanto, para um meio anisotrópico homogêneo a relação se modifica e obedece a equação abaixo:

$$\rho_{a\gamma} = \rho_{aa} - \rho_{a\beta}.$$

Quanto ao fator geométrico K para esse arranjo, Habberjam e Watkins (1967), definiram a Equação 2.7, onde a é o espaçamento entre os dipolos:

$$k = \frac{2\pi a}{2 - 2^{1/2}} \quad (2.7)$$

2.3.4.4 Arranjo Dipolo-dipolo

O arranjo Dipolo-dipolo (D-D), também chamado de dispositivo dipolar axial (Orellana, 1972) é largamente usado na prática para diversos fins, como mineração, hidrogeologia, geotecnia, estudos ambientais e prospecção de água subterrânea.

A configuração desse arranjo utiliza dois dipolos de recepção (MN) e dois de corrente (AB) separados de uma distância a . Durante o levantamento por caminhamento elétrico, o dipolo MN é movido se distanciando do dipolo AB, que se mantém fixo, de um incremento na (Gandolfo, 2007). Cada distância entre os dipolos irá corresponder a um nível de investigação (Figura 2.9) e é possível estudar variações horizontais de características geoeletricas, atingindo várias profundidades (Braga, 2007).

Quanto maior a distância entre os dois dipolos, maiores profundidade de investigação serão alcançadas. Para a execução do levantamento, todo o arranjo é deslocado de uma distância igual a do espaçamento entre os dipolos. Fazendo-se consecutivas repetições desse procedimento, é possível confeccionar uma seção de resistividade aparente ao longo da linha na qual o levantamento foi realizado (Gandolfo, 2007).

O valor da resistividade aparente medida é representada em uma seção de pseudo-resistividade, obtida pelo encontro de retas que partem do centro dos dipolos, ou seja, do ponto médio desses a 45° (Gandolfo, 2007). É chamada de pseudo resistividade pois as profundidades plotadas equivalem a profundidades teóricas e a resistividade calculada é aparente, sendo assim a seção não é a real (Braga, 2007).

Figura 2.9: Configuração Dipolo-dipolo com o sentido do caminhar (Gandolfo, 2007).

É importante notar que a medida em que o dipolo MN se afasta do dipolo de corrente, menores serão as leituras de ΔV obtidas. Nesse caso, o ruído fica na mesma ordem de grandeza do sinal, o que torna conveniente realizar a busca em até 6 níveis de investigação. Caso se use equipamento de maior sensibilidade e potencial é possível atingir mais níveis de investigação (Gandolfo, 2007).

Para esse arranjo o fator geométrico K é dado pela Equação 2.8, onde a é o espaçamento entre os eletrodos de corrente ou potencial e n é a distância entre os eletrodos B e M, ou seja, é a distância externa entre os eletrodos.

$$K = \pi a n(n + 1)(n + 2) \quad (2.8)$$

2.3.4.5 Arranjo Dipolo-dipolo equatorial (DDE)

Esse tipo de arranjo, também utiliza dois eletrodos de corrente e dois de potencial, que possuem o mesmo espaçamento a entre si. A diferença em relação aos outros arranjos dipolos é quanto à disposição dos pares de dipolos. Como se pode notar pela Figura 2.10 os eletrodos de corrente (C1 e C2) e de potencial (P1 e P2) estão posicionados paralelamente entre si, separados por uma distância $b=na$, onde a é o espaçamento entre os eletrodos e n é um fator multiplicador que determina a distância entre os dipolos e o tamanho do arranjo, sendo seu valor mínimo igual a 5 (Figura 2.10) (Loke, 1999).

Figura 2.10: Configuração do arranjo Dipolo-dipolo equatorial (DDE) (Loke, 1999).

O fator K para esse arranjo é dado pela Equação 2.9:

$$K = \frac{2\pi bL}{L-b} \quad (2.9)$$

onde $L = (a^2 + b^2)^{0,5}$.

2.3.5 Equipamentos usados em levantamentos eletrorresistivos

De maneira geral, os equipamentos usados nos levantamentos eletrorresistivos são constituídos por resistímetro, bateria e eletrodos para emissão e recepção dos sinais enviados (Cavalcanti, 2013). O resistímetro é o principal equipamento utilizado nas medições, pois é responsável pela injeção de corrente no subsolo e pela medição da diferença de potencial. Atualmente, são usados resistímetros multi-eletrodos, que realizam a troca automática dos mesmos e permite o armazenamento temporário dos dados medidos. Isto possibilita que os dados sejam transferidos diretamente para um *software* de tratamento, economizando tempo na execução do trabalho (Oliveira, 2009).

Existem resistímetros com vários canais, os chamados multicanais de eletrodos (*multi-channel*), nos quais são possíveis várias leituras do potencial de forma simultânea para uma mesma corrente injetada (Oliveira, 2009). Esse dispositivo permite ainda a comutação de combinações entre os eletrodos de potencial e de corrente.

Um conjunto de n eletrodos é ligado através de um cabo com n fios e por meio de uma caixa de comutação as combinações são programadas pelo usuário e executadas de

forma automática. A vantagem desse equipamento está na rapidez e praticidade de aquisição de dados tanto em campo quanto em laboratório (Figura 2.11) (Fachin, 2012).

Figura 2.11: Dispositivo de multi-canal de eletrodos e equipamentos de aquisição de dados (Fachin, 2012).

A potência do resistivímetro pode variar de watts até alguns quilowatts e emite correntes que variam de 5mA a 500mA. O potencial pode variar de 10mV a 20V. Esses equipamentos podem trabalhar com corrente contínua ou alternada de baixa frequência (Cavalcanti, 2013). Além disso, usam-se eletrodos polarizados de aço, cabos elétricos, bateria externa e computador para aquisição e interpretação dos dados adquiridos. Para corrente contínua, recomenda-se utilizar eletrodos não polarizáveis (Cavalcanti, 2013).

2.3.6 Profundidades de investigação

Quando o solo é homogêneo, isotrópico e uniforme, a profundidade de penetração da corrente aumenta com a separação dos eletrodos de corrente (Oliveira, 2009). Para esse mesmo autor a escolha do espaçamento entre os eletrodos de corrente deve ser feita de modo que a corrente injetada na superfície atinja, ou pelo menos seja próxima, a profundidade a ser investigada. Além disso, o espaçamento deve ser no mínimo o dobro ou mais que três vezes a profundidade requerida para qualquer arranjo.

Observando alguns tipos de arranjos, os espaçamentos dos eletrodos a e comprimento total do arranjo (L), Loke (1999) estabeleceu relações com a profundidade de investigação Z . Segundo esse autor, para cada tipo de arranjo existe um fator de

profundidade, que ao multiplicá-lo pelo espaçamento entre os eletrodos ou pelo comprimento total do arranjo, tem-se a profundidade média de investigação (Z) (Tabela 2.2). Para o arranjo Wenner, pode-se considerar tanto o espaçamento a ou o comprimento total do arranjo. Já para os outros arranjo é conveniente e mais fácil utilizar o fator profundidade ao partir do comprimento total do arranjo (Loke,1999).

Para o arranjo Quadrático, Habberam e Watkins (1967) constituíram uma equivalência usando os arranjos Wenner ou Schlumberger. A relação entre o comprimento do quadrado no arranjo Quadrático e o tamanho equivalente nos arranjos Wenner ou Schlumberger é dado pela Equação 2.10, onde $r=AM$ e $s=MN$ e A é o tamanho equivalente do quadrado no arranjo Quadrático.

$$A=r \left[\frac{2(r+s)}{2r+s} \right] \quad (2.10)$$

Dessa maneira, como no arranjo Wenner $AM=MN=a$; $r=s=a$. O fator multiplicador para o arranjo Quadrático será o mesmo para o arranjo Wenner, porém deve-se converter o tamanho da aresta do quadrado pela expressão acima e multiplicar o valor encontrado pelo fator multiplicador de profundidade segundo Loke (1999) (Tabela 2.2).

Outros fatores, além do espaçamento entre os eletrodos são importantes na determinação da profundidade de investigação, sendo eles o tipo de arranjo escolhido, características dos terrenos e capacidade dos equipamentos de medição. Em campanhas que demandam maiores profundidades, como grandes prospecções, é importante trabalhar com um equipamento que injete maior intensidade de corrente e/ou o local possuir baixa resistência a injeção da mesma (Benard, 2003).

Tabela 2.2: Relação dos arranjos com a profundidade de investigação de acordo com o espaçamento de MN e tamanho total do arranjo (modificado Loke, 1999).

Tipo de arranjo	Níveis (n)	Z/a	Z/L
Wenner	-	0,519	0,173
Dipolo-dipolo	n=1	0,416	0,139
	n=2	0,697	0,174
	n=3	0,962	0,192
	n=4	1,22	0,203
	n=5	1,476	0,211
Dipolo-dipolo equatorial	-	0,451	0,319
Schlumberger	-	0,52	0,173
Quadrático	-	0,519	0,173

2.4 Aplicação de métodos geoeletricos em geotecnia

Em geotecnia, os métodos geoeletricos são utilizados para caracterizar os maciços rochosos em subsuperfície, principalmente quanto às características de suas descontinuidades. Tais características irão determinar se o maciço é um condutor de fluidos, que do ponto de vista geotécnico pode não ser favorável. Em fundações e ombreiras de barragem formada por maciços rochosos, a presença de descontinuidades pode gerar sérios problemas de percolação de água e gerar até mesmo a ruptura da estrutura (Zorzi e Rigoti, 2011).

Por esse motivo, conhecer bem as condições das descontinuidades em subsuperfície é importante para caracterizar problemas geotécnicos diversos e o quanto antes solucioná-los. É assim que os métodos geoeletricos, como SP e resistividade, se tornam uma ótima alternativa para avaliar as condições hidráulicas do maciço em subsuperfície. Na Tabela 2.3 são abordados os principais objetivos e a eficácia de cada método geoeletrico em diversas situações.

Tabela 2.3: Aplicação dos principais métodos geoeletricos. Notar a eficácia da resistividade. (modificado Braga, 2007).

APLICAÇÃO DOS MÉTODOS GEOELÉTRICOS			
Objetivos	Resistividade	Potencial Espontâneo	Polarização Induzida
Falhas e fraturas	Bom	Bom	Bom
Topo rochoso	Bom	Não recomendado	Limitado
Carstes e cavidades	Bom	Bom	Limitado
Profundidade do NA	Bom	Não recomendado	Não recomendado
Profundidade e espessura de aquífero	Bom	Não recomendado	Não recomendado
Estimativa de parâmetros hidráulicos	Bom	Não recomendado	Não recomendado
Fluxo de água subterrânea	Bom	Bom	Limitado
Plumas de contaminação	Bom	Bom	Bom

É comum, para a prospecção de água subterrânea utilizar o método da eletrorresistividade. Para se explorar um aquífero é preciso conhecer bem a profundidade do topo, a espessura do mesmo, além de se distinguir bem as estruturas da região, como descontinuidades. Isso irá facilitar os projetos de construção de poços para suprir a demanda de água (Cutrim, 2011). Regiões com muitas descontinuidades são mais propícias a acumulação, circulação e recarga de água, tornando a mesma forte potencial a ser um aquífero. Por isso é comum usar a eletrorresistividade para caracterizar um maciço fraturado nessa situação, e posteriormente investigá-lo por sondagens mecânicas (Oliveira e Brito, 1998).

Além da prospecção de aquíferos, a eletrorresistividade pode ser usada na detecção de plumas de contaminação, que podem ser geradas pela disposição final de resíduos sólidos, tais como aterro sanitário, lixão e aterro controlado. Em aterros controlados e

lixões a geração de chorume é capaz de contaminar o subsolo e a água através da percolação. A decomposição da matéria orgânica juntamente com os metais pesados acaba por contaminar o subsolo, as águas subterrâneas e as superficiais (Cavalcanti, 2013). Sendo assim, a eletrorresistividade se torna útil para encontrar possíveis pontos de vazamento desse material, evitando a contaminação desenfreada do subsolo.

Outra situação em que o uso da eletrorresistividade pode ser eficaz é em barragens. É comum ocorrer rompimentos de barragens, tanto aquelas com a finalidade de contenção de água quanto as de rejeitos, à exemplo do que ocorreu na mineradora Samarco em novembro de 2015. Estudos comprovam que a ocorrência desses eventos está cada vez mais comum e que muitas vezes esses acidentes estão relacionados a erosão interna (*piping*) dos corpos de terra, com a formação de descontinuidades, tanto no corpo da barragem quanto em suas ombreiras (Mainali, 2006).

A percolação excessiva de água causa alteração, lixiviação e erosão interna, deteriorando a condição mecânica do maciço da barragem, seja ele de terra ou concreto (Zorzi e Rigoti, 2011). Pode também ocorrer percolação de água nas fundações e ombreiras de uma barragem, gerando condições de instabilidade nesses empreendimentos. Se em fase inicial do desenvolvimento, a percolação anormal de água nessas estruturas pode ser detectada através de métodos geofísicos, tais como a eletrorresistividade e potencial espontâneo (Mainali, 2006).

Por fim, outra aplicação que merece atenção é a identificação de regiões cársticas, que podem ocorrer em fundação de obras civis e assim prejudicar a estabilidade desses empreendimentos. Sendo assim, é necessário identificar a presença dessas cavidades e o método da eletrorresistividade pode auxiliar muito nessa busca (Leão, 2014).

2.5 A técnica de levantamento azimuthal

Para otimizar a caracterização e ampliar as possibilidades de investigação de meios fraturados, alguns estudiosos desenvolveram técnicas diferenciadas das convencionais. Caracterizar descontinuidades é de suma importância em estudos geotécnicos e hidrogeológicos (Watson e Barker, 2010). Descontinuidades geram mudanças nas

propriedades produzidas e podem provocar uma mudança direcional das propriedades físicas do maciço, passível de ser reconhecida por anisotropias elétricas.

Por conseguinte, o levantamento azimutal é frequentemente usado para determinar a anisotropia elétrica de meios fraturados em subsuperfície, utilizando os métodos geoeletricos de eletrorresistividade e SP. Esse levantamento utiliza os mesmos equipamentos de um levantamento convencional de eletrorresistividade, podendo-se utilizar diversos tipos de arranjos, fixados em um ponto central e assim, medir a resistividade aparente em função do azimute, em incrementos que podem ser de 10° ou mais (Taylor e Fleming, 1988).

Os dados de levantamento azimutal, tanto em laboratório quanto em campo, caso o meio seja anisotrópico, tendem a gerar uma elipse de resistividade aparente, que normalmente é plotada juntamente com os dados das direções das discontinuidades, visando uma melhor comparação dos resultados (Watson e Barker, 2010). A Figura 2.12 exemplifica a distribuição espacial dos eletrodos de um levantamento azimutal, utilizando os métodos de resistividade e SP, para adquirir dados de discontinuidades em modelos reduzidos de laboratório (Wishart *et al.*, 2006).

Figura 2.12: Geometria, em planta, de um levantamento azimutal de resistividade e potencial espontâneo (modificado Wishart *et al.*, 2006).

Segundo Watson e Barker (1999), existem duas escalas de anisotropia: a macro, que está relacionada a diferentes valores de resistividade que ocorrem devido à alternância de diferentes rochas ou solo, e a micro, que está relacionada à variação de resistividade com a direção dentro de uma mesma camada de rocha ou solo. Esses dois tipos de anisotropia podem ser medidos pelos métodos da eletrorresistividade.

Na maioria das rochas, descontinuidades ocorrem em conjunto, com uma orientação mais ou menos definida. Se as descontinuidades forem horizontais, a contribuição dessas será para a caracterização da permeabilidade horizontal independente da direção, porém quando as descontinuidades são verticais ou inclinadas, ocorre uma distribuição anisotrópica da condutividade elétrica (Watson e Barker, 1999) em resposta à variação da condutividade hidráulica.

A distribuição do potencial devido a um ponto de origem em um meio anisotrópico é encontrado pela transformação equação de Laplace, aplicada quando o meio é isotrópico, por uma simples mudança no sistema de coordenadas (Watson e Barker, 1999). Se o maciço rochoso, fraturado ou estratificado, exibir anisotropia bidimensional, somente duas variáveis são usadas na transformação: a resistividade longitudinal (ρ_L), que é paralela ao plano de estratificação ou fraturamento, e a resistividade transversal (ρ_T), normal a esses planos. Segundo Boris (2005), a resistividade transversal e a longitudinal podem ser expressas pelas Equações 2.11 e 2.12, respectivamente.

$$\rho_t = \frac{\sum_{i=1}^m \rho_i h_i}{\sum_{i=1}^m h_i} \quad (2.11)$$

$$\rho_l = \frac{\sum_{i=1}^m h_i}{\sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\rho_i}} \quad (2.12)$$

Usando ρ_l e ρ_t , é possível calcular dois parâmetros diagnósticos de um meio anisotrópico: o coeficiente de anisotropia (λ) e a resistividade média (ρ_m). Esses parâmetros são regidos pela Equações 2.13 e 2.14.

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}} \quad (2.13)$$

$$\rho_m = \sqrt{\rho_l \rho_t} \quad (2.14)$$

Para um meio isotrópico homogêneo, o valor de λ é igual a 1, pois a resistividade é igual em todos os pontos. Para meios anisotrópicos homogêneos o valor de λ fica entre 1 e 2, pois a ρ_t é maior que ρ_l . Quanto maior esse valor, mais anisotrópico é o meio (Watson e Barker, 1999).

Autores como Goriunov e Molotkov (1961, *apud* Taylor e Fleming, 1988), Keller e Frischknecht (1966, *apud* Taylor e Fleming, 1988), Taylor (1982, *apud* Taylor e Fleming, 1988) Taylor (1984, *apud* Taylor e Fleming, 1988) desenvolveram uma teoria para maciços fraturados, que por definição são eletricamente anisotrópicos. Esses autores consideraram uma unidade hidrológica fraturada (Figura 2.13), que seja governada por uma versão simplificada da equação de Laplace, caso a frequência das descontinuidades seja alta o suficiente, em uma escala apropriada, para tornar o meio homogêneo anisotrópico (Taylor e Fleming, 1988).

Figura 2.13: Esquema de um maciço fraturado submetido a um levantamento azimuthal (modificado de Taylor e Fleming, 1988).

A solução dessa equação fornece um potencial (U) em qualquer ponto (x, y, z), resultante da injeção de corrente de entrada de magnitude I . Considerando somente medições feitas em superfície, onde $z=0$, e utilizando um sistema de coordenadas polares, a expressão para a equação simplificada de Laplace é (Equação 2.15) (Taylor e Fleming, 1988):

$$U = \frac{I\lambda\rho_x}{2\pi r(\cos^2\theta + \lambda^2\sin^2\theta)^{1/2}} \quad (2.15)$$

Onde λ é o coeficiente de anisotropia, ρ_x é a resistividade aparente na direção x e θ é o ângulo entre a linha de medida da resistividade com a direção da descontinuidade, conforme pode-se notar pela Figura 2.14 (Taylor e Fleming, 1988).

Para um arranjo Wenner convencional, que consiste de quatro eletrodos separados igualmente entre si, a medição de resistividade aparente (ρ_a), resultante da distribuição de potencial é dada pela Equação 2.16:

$$\rho_a = \frac{\lambda\rho_x}{(\cos^2\theta + \lambda^2\sin^2\theta)^{1/2}} \quad (2.16)$$

Taylor e Fleming (1988) definiram assim a elipse teórica da resistividade aparente, que está apresentada na Figura 2.14.

Figura 2.14: Elipse teórica de resistividade aparente para arranjo azimuthal colinear (Taylor e Fleming, 1988).

2.6 O paradoxo da anisotropia

Em levantamentos eletrorresistivos em regiões onde o maciço rochoso se encontra horizontalmente laminado e a medição é feita em poços verticais, espera-se que, ao se injetar uma corrente através dos eletrodos AB e medir a diferença de potencial entre os eletrodos MN, a resistividade aparente fornecida estivesse próxima a resistividade aparente vertical. No entanto, repetidos registros eletrorresistivos mostraram que essa medida de resistividade aparente estava perto da resistividade aparente horizontal e que a resistividade aparente vertical era aparentemente nula. Esse comportamento inesperado tornou-se conhecido como o paradoxo da anisotropia (Luling, 2013).

O paradoxo pode ser explicado se for considerada a distribuição de potencial para uma superfície em torno de um eletrodo de corrente (Figura 2.15). Para Boris (2005), $\rho_1 < \rho_2$, pois na direção ρ_1 , o potencial é menor do que na direção ρ_2 , para uma dada corrente I . Se R_1 e R_2 são as distâncias do eletrodo de corrente até o potencial alcançado V , considerando as respectivas direções ρ_1 e ρ_2 , nota-se que $R_1 > R_2$ (Figura 2.15). Logo, considerando que a resistividade aparente é calculada segundo a equação $\rho_a = 2\pi R V / I$, $\rho_{a1} > \rho_{a2}$, fato conhecido como o paradoxo de anisotropia. Assim, nas elipses, se o paradoxo ocorrer, o eixo maior será coincidente com a direção da descontinuidade principal.

Figura 2.15: Paradoxo de anisotropia segundo Boris (2005).

O paradoxo é um fenômeno descrito apenas para arranjos elétricos colineares (Taylor e Fleming, 1988; Pergava *et al.*, 2001). Porém, o paradoxo somente ocorre quando o levantamento é feito diretamente sobre o maciço rochoso ou quando a relação do espaçamento entre os eletrodos pela cobertura de solo (a/h) é elevada. Watson e Barker, (2010), por exemplo, identificaram o paradoxo de anisotropia para levantamentos azimutais com arranjo Wenner para valores de a/h superiores ao intervalo de 8 a 24. Ou seja, quando o maciço rochoso se encontra a baixa profundidade (baixo h), deve-se empregar o espaçamento entre os eletrodos, para arranjo Wenner, com relação a/h inferior a 8, para evitar o paradoxo. Quando não possível, deve-se atentar para este fenômeno na interpretação dos resultados.

2.7 Elipses de resistividade aparente

Taylor e Fleming (1988) conduziram levantamentos eletrorresistivos azimutais em diversas litologias, como gabbro, basalto, dolomitos e areias finas. As medidas de resistividade aparente foram feitas em incrementos angulares de 10° , utilizando o arranjo Wenner, com espaçamentos entre os eletrodos variando de 5 a 10 metros.

Nesse estudo, um mínimo de 50 descontinuidades orientadas foram medidas em cada local, além de outras características, como comprimento das fraturas e frequência das mesmas. As medições das direções das descontinuidades foram retratadas em diagramas estrutural de rosetas, que definem a frequência com que as descontinuidades ocorrem em cada azimuth (Taylor e Fleming, 1988).

Esses autores definem típicas elipses de resistividade aparente, que são de grande utilidade nas interpretações dos dados de resistividade aparente azimutal. Essas elipses podem ser plotadas isoladas ou juntamente com os dados das direções das descontinuidades. Taylor e Fleming (1988) definiram três tipos básicos de elipses de resistividade aparente, nomeadas por eles de tipo A, tipo B e tipo C.

A elipse tipo A possui um pico único, que coincide com a direção principal do conjunto de descontinuidades mais proeminente (Figura 2.16-A). Já a elipse do tipo B possui dois picos ou mais, coincidentes com as direções principais dos conjuntos de descontinuidades relevantes. Esses picos podem ter magnitudes similares ou diferentes. Nesse caso, é interessante notar que o pico mais largo indica o conjunto de descontinuidades com maior frequência, ao passo que o pico mais estreito expressa o conjunto de descontinuidades com a uma gama menor de orientações (Figura 2.16-B).

Figura 2.16: Em A, tem-se a elipse tipo A. Em B, nota-se a elipse tipo B (Taylor e Fleming, 1988).

A elipse tipo C apresenta um ou mais picos que não coincidem com a direção principal de nenhum dos conjuntos de descontinuidade medido. A Figura 2.17 mostra um diagrama com a elipse do tipo C e facilmente se nota que o eixo maior da elipse corta a região entre o conjunto de descontinuidades observado. Esse resultado mostra que a orientação da elipse está fortemente ligada a conectividade das fraturas presente no substrato, gerando um resultado combinado dessa conectividade (Taylor e Fleming, 1988).

Figura 2.17: Elipse tipo C de Taylor e Fleming (1988).

Diante disso, Taylor e Fleming (1988) relacionam intimamente a frequência e a conectividade dos conjuntos de juntas à forma que a elipse de resistividade aparente assume. A Figura 2.18 resume as três situações retratadas por esses autores.

Figura 2.18: Em (1) geometria das discontinuidades e a elipse A resultante dessa configuração. Em (2) e (3) geometria e elipses tipo B e C, respectivamente (Taylor e Fleming, 1988).

É interessante notar que as elipses de resistividade aparente de Taylor e Fleming (1988) apresentam o eixo maior coincidente com a direção de discontinuidades principais, comportamento previsto pelo paradoxo de anisotropia.

2.8 Modelos físicos reduzidos de maciços rochosos

Um modelo físico reduzido é uma ferramenta usada para projetar um protótipo e realizar uma interpretação simplificada da realidade (Rios, 1986). Pode ser utilizado em diversos ramos, como engenharia civil, engenharia mecânica, geologia, geotecnia, entre outros.

A construção de modelos físicos, em escalas reduzidas, embora experimentado anteriormente por Arquimedes, Leonardo Da Vinci e outros estudiosos só foi possível após a descoberta da Teoria da Semelhança Mecânica por Isaac Newton e do Teorema de Bridgman (Rios, 1986).

Um bom exemplo de modelos reduzidos em geotecnia é a confecção de réplicas de usinas hidrelétricas, como UHE de Tucuruí (Rios, 1986). Modelos reduzidos de laboratório também são usados na reprodução de maciços rochosos ou réplicas dos mesmos, em tanques de acrílico ou vidro, para avaliar e caracterizar as condições das descontinuidades nesses maciços, utilizando métodos geofísicos, como por exemplo o levantamento eletrorresistivo azimuthal.

Na modelagem em tanques em laboratório, uma parte representativa dos maciços ou réplicas dos mesmos são imersos em água ou outro material, como areia e a superfície é explorada da mesma forma que em levantamentos geoeletricos de campo. Uma grande vantagem desse experimento é a possibilidade de visualização completa do maciço, visto que as paredes do tanque são transparentes, além de se trabalhar em condições controladas (Watson e Barker, 2010).

Já as desvantagens estão no grande tempo gasto para a montagem e execução do modelo e também nas imprecisões que possam ocorrer no que diz respeito aos resultados (Watson e Barker, 2010). Existem inúmeros trabalhos disponíveis na literatura sobre os experimentos supracitados, porém nesse estudo serão enfatizados dois deles:

2.8.1 Modelo de Wishart *et al.* (2006)

No experimento de Wishart *et al.* (2006), foram realizados os levantamentos de eletrorresistividade azimutal (ARS) e potencial espontâneo azimutal, o chamado ASP. Estes autores reproduziram um maciço fraturado do dolomito da Formação Wisconsin Niagaran cuja dimensões foram de 45 cm x 25 cm e aproximadamente 7 cm de altura. O mesmo foi introduzido em um tanque de vidro, preenchido com areia, com dimensões de 91,5 cm x 61 cm x 30,5 cm. Sobre o maciço, foi adicionada uma camada de 3 cm de areia saturada com solução eletrolítica de NaCl e um sistema de fluxo foi acoplado a base do tanque, utilizando uma bomba de injeção. O bom contato elétrico na superfície foi garantido devido à areia úmida (Figura 2.19).

Figura 2.19: Representação esquemática tanque experimental do modelo de Wishart *et al.* (2006).

As medições de potencial espontâneo e eletrorresistividade azimutal foram realizadas utilizando arranjos dipolo assimétricos e o levantamento de eletrorresistividade foram adquiridos usando o arranjo Dipolo-dipolo, que seria o mais sensível à anisotropia. Ambos foram rotacionados simultaneamente em segmentos de 20° (Wishart *et al.*, 2006).

Ao final das medições, todos os dados de ambos os levantamentos foram plotados em gráficos polares juntamente com as rosetas, que mostram as direções das discontinuidades, obtidos em mapeamento das discontinuidades em campo.

2.8.2 Modelo de Watson e Barker

Watson e Barker (2010) realizaram em seu estudo apenas levantamentos de eletrorresistividade com o arranjo Wenner *offset*. O experimento foi realizado em um tanque de vidro, cujas dimensões são 100 cm x 100 cm x 50 cm e espessura de 1 cm. O tamanho do tanque foi considerado largo o suficiente para evitar os efeitos de bordas para o espaçamento (a) máximo dos eletrodos considerado nesse estudo, que foi de 8 cm.

De acordo com Goudswaard (1957), para que não ocorra efeitos das bordas do tanque sobre as medições é necessário que o modelo ocupe cerca de 30% do tamanho do tanque, estando este posicionado na parte central. Conforme o autor supracitado, para aprimorar os resultados pode-se isolar as paredes do tanque, cobrindo-as com uma fina malha de arame.

O maciço anisotrópico de Watson e Barker (2010) foi construído a partir de placas de isopor revestidas com filme de PVC, dispostas paralelamente entre si. Utilizaram-se 80 placas, cada uma com as dimensões de 20 cm × 80 cm e espessura de 0,5 cm, separadas por anilhas de plástico de 0,5 cm de espessura. Essas placas foram unidas com o auxílio de uma haste rosqueada no modelo, passando pelos cantos do mesmo (Figura 2.20).

Figura 2.20: Representação esquemática do tanque experimental de Watson e Barker (modificado de Watson e Barker, 2010).

Para a fixação dos eletrodos, Watson e Barker (2010) construíram uma de galeria de eletrodos, composta por uma viga de alumínio, presa em uma pequena borda de vidro, que se localiza no lado interno do tanque. A função dessa viga é suportar o conjunto de rotação dos eletrodos (Figura 2.21), que é composto por um cilindro de PVC, fixado na parte de dentro da viga de alumínio onde encontram-se conectados dois discos de acrílico: o disco superior é fixo e está marcado com uma escala angular a cada dois graus, enquanto o disco inferior pode girar livremente (Figura 2.21).

Preso em cada lado do disco inferior encontra-se uma haste de acrílico, de onde pende a plataforma de eletrodos, que também tem capacidade de rodar. Ela é composta por uma placa de acrílico com 6 mm de espessura e sua função é comportar os eletrodos, que possuem 3 mm de diâmetro e foram feitos de aço inoxidável (Watson e Barker, 2010).

Cada eletrodo foi inserido em uma pequena abertura da plataforma e posteriormente foram conectados a uma caixa de rearranjo de eletrodos, que seleciona a configuração e o espaçamento (a) desejado na medição (Figura 2.22). Os espaçamentos utilizados nesse modelo foram de 2 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm e 8 cm. Essa caixa foi conectada a um multímetro, que empregou ao modelo uma corrente de 1mA (Watson e Barker, 2010).

Figura 2.21: Tanque de Watson e Barker, vista de planta com seus respectivos componentes (modificado de Watson e Barker, 2010).

Figura 2.22: Tanque de Watson e Barker, com todos os componentes. Vista e perfil (modificado de Watson e Barker, 2010).

Após a montagem do tanque e da galeria de eletrodos, esse foi completamente preenchido com água para avaliar em que profundidade as condições isotrópicas seriam alcançadas. Primeiramente, foi necessário verificar o mínimo da profundidade de água em que a influência do fundo do tanque pode ser desprezada. Para esse fim, o tanque foi preenchido com água e posteriormente realizaram levantamentos eletrorresistivos,

usando o arranjo Wenner *Offset*, posicionado no centro do tanque (Watson e Barker, 2010).

A Figura 2.23 mostra a resistividade aparente calculada em função da razão do espaçamento de eletrodos com a profundidade de água. Nota-se pela Figura 2.23, que a porção plana da curva corresponde a condição isotrópica (a/h variando de 0,08 a 0,4). Para $a/h > 0,4$ a curva mostrou uma forte elevação, que indica a influência da resistividade da base do tanque. Consequentemente, de acordo com levantamento realizado, para o maior espaçamento entre os eletrodos (8 cm) considerado por Watson e Barker (2010), o valor de h deve ser igual ou maior que 200 mm (Figura 2.23).

Figura 2.23: Relação espaçamento de eletrodos (a) /profundidade de água e a resistividade aparente. Notar condição anisotrópica para valores acima de 0,4 (a/h) (modificado de Watson e Barker, 2010).

Os levantamentos foram realizado em três situações diferentes: simulação de uma interface inclinada na face superior do modelo, medições considerando somente a anisotropia pela abertura das placas de isopor e a combinação dessas duas situações.

Em cada levantamento Wenner *offset*, as resistências R_{D1} foram posicionadas ao norte de R_{D2} , ao longo da posição 0° , ficando distantes um do outro em 180° . Por se tratar de

um sistema simétrico, espera-se que as medições em 0° e 180° seja idênticas e para melhorar a qualidade das medições foi registrado, em intervalos de 10° , valores de resistividade até completar 360° . Devido a simetria do modelo e visando facilitar a coleta de dados, foram coletados e plotados duas vezes os dados de 0° a 180° , completando-se assim medidas ao longo de 360° .

Os resultados dessa etapa mostraram, para os três mergulhos considerados (4° , 8° e 12°), que a máxima discrepância entre R_{D1} e R_{D2} ocorreu na posição 90° , logo também na posição 270° . Nota-se também que os pontos de cruzamento de R_{D1} e R_{D2} foram identificados na posição 0° , e consequentemente também na 180° (Figura 2.24).

Figura 2.24: Curvas de R_{D1} e R_{D2} para a simulação da interface inclinada. Em cinza tem-se R_{D1} e em preto R_{D2} (modificado de Watson e Barker, 2010).

Para a anisotropia, os autores consideraram o modelo formado pela 80 placas, conforme descrição prévia. O modelo foi submerso no tanque de modo que a estratificação vertical, formada pelo encontro das placas de isopor, ficou orientada na direção norte-sul. Os levantamentos azimutais utilizaram os espaçamentos entre eletrodos de 2 cm, 4 cm, 6 cm e 8 cm para a variação de diferentes espessuras da linha água acima da face superior do modelo (6 cm, 2 cm, 1,5 cm, 1 cm, 0,5 cm e 0,25 cm).

Para a combinação das duas situações (anisotropia + interface inclinada), o modelo foi inclinado em um ângulo de 8° , com as placas posicionadas paralelamente entre si,

conforme o modelo da anisotropia. A seguir, o modelo foi disposto em três direções distintas e coberto por uma espessura variável de água. As três posições consideradas foram: a orientação da camada (placas) e a interface de mergulho são paralelas, a orientação das placas e a interface de mergulho fazem de 45° entre si e a orientação das placas e a interface de mergulho são perpendiculares entre si (Figura 2.25).

Figura 2.25: Três combinações do modelo de anisotropia e interface de mergulho (modificado de Watson e Barker, 2010).

A Figura 2.26 mostra os resultados dos levantamentos supracitados. Na opção em que a orientação da camada é paralela à interface nota-se que a resposta Wenner traçou uma elipse e com pequena anisotropia aparente ($\lambda=1,05$). Além do mais o gráfico cartesiano mostra uma pequena variação entre as resistividades aparentes na posição 90°/270° em relação a posição 0°/180° (Figura 2.26 - A).

Na Figura 2.26 - B, o eixo maior da elipse é orientado na posição 70°/250° e o grau de anisotropia aparente aumentou. Na condição em que as camadas e o mergulho da interface estão perpendiculares entre si, a intensidade da anisotropia não muda ($\lambda=1,10$), porém a elipse está novamente orientada a posição Leste-Oeste (Figura 2.26 - C). Para ambos os casos, os gráficos cartesianos mostram uma maior discrepância nas posições 90°/270° e 0°/180°.

Figura 2.26: Em A, elipse e gráfico cartesiano para a condição de placas e mergulho paralelos entre si. Em B, elipse e gráfico cartesiano para a condição de placas e interface de mergulho a 45 ° e em C, elipse e gráfico posicionados perpendiculares entre si (modificado de Watson e Barker, 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Preparação do tanque

Todo o experimento foi baseado nos trabalhos feitos por Wishart *et al.* (2006) e Watson e Barker (2010), citados no referencial teórico (Capítulo 2). Para tal, utilizou-se um tanque de acrílico transparente, com paredes de 1 cm de espessura e base quadrada, com arestas de 1 m e altura de 0,50 m. Primeiramente, encheu-se o tanque com 0,3 m³ de água potável, até a altura de 0,30 m, para avaliar a resistência das suas paredes e a estanqueidade. A água foi mantida no tanque por três dias consecutivos e ao final desses notou-se uma ligeira deformação em suas paredes (Figura 3.1).

Figura 3.1: Tanque de acrílico preenchido com água para verificar a resistência e estanqueidade.

Diante disso, foi necessário reforçar as paredes do tanque para garantir que o mesmo não se rompesse ou sofresse algum dano durante a execução dos ensaios, devido à esforços exercidos pelos materiais inseridos no mesmo (areia + água + rocha). Tal reforço foi feito utilizando-se 12 cantoneiras de madeira, com dimensões de 0,050 m X 0,035 m, fixadas nas arestas do tanque. No centro dessas cantoneiras, foi feita uma

ranhura central, na qual se passou um fio de nylon resistente, capaz de suportar até 70 kg (Figura 3.2 – A). Além disso, utilizaram-se 3 cintas de material resistente, duas com 2,5 cm de espessura e outra com 0,4 cm de espessura, para contornar todo o tanque em três alturas distintas (Figura 3.2 – B).

Figura 3.2: Em A, cantoneira utilizada para reforço das laterais do tanque. Em (B), tem-se todo o aparato de reforço, com ênfase nas cintas resistentes.

3.2 Construção do maciço fraturado

Após todo o preparo e reforço do tanque, iniciou-se a montagem do maciço fraturado, diretamente dentro do mesmo. Foram montadas duas situações distintas em momentos também diferentes: a primeira, com uma descontinuidade central de 5 mm e 23 mais delgadas, formadas pelo encontro das placas, com aproximadamente 0,5mm cada. A segunda com 19 descontinuidades de 5 mm distribuídas por todo o maciço. Optou-se por utilizar placas lisas de mármore cristalino branco, pois por se tratar de uma rocha é um material denso, permanecendo fixo no fundo do tanque sem sofrer processo do empuxo quando da adição de água, além de ser um material de alta resistência elétrica.

Para tal foram utilizados até 25 placas de mármore, previamente cortadas em local especializado, com 20 cm de altura, 50 cm de comprimento e 2 cm de espessura (Figura 3.3 - A). Essas placas foram então justapostas umas as outras, para formar os dois tipos de maciços usados nesse experimento. Os modelos foram posicionados no centro do tanque e possuem a dimensão final de 50 cm x 50cm e 20 cm de altura, obedecendo as recomendações de Goudswaard (1957). Segundo esse autor, para evitar problemas com

efeitos de borda, até cerca de 30% do tanque pode ser usado nos levantamentos elétricos, com os arranjos de eletrodos posicionados no centro da caixa. Por conseguinte, para esse trabalho, os levantamentos foram executados de forma que o comprimento total dos arranjos não ultrapassasse de 30 cm do comprimento.

O maciço rochoso foi então sustentado no centro do tanque com areia média, colocada nas suas laterais (Figura 3.3 - B). No total, foram consumidos $0,23\text{m}^3$ de areia, considerando a espessura máxima de cobertura de areia para representar o solo, que foi de 8 cm de areia.

Figura 3.3: Observa-se em A placa de mármore utilizada na construção do maciço fraturado. Em B, tem-se a montagem do modelo em planta, no interior do tanque de acrílico.

Após completamente preenchido por areia média, todo o modelo foi saturado, inserindo-se água potável no tanque. O controle da saturação foi garantido utilizando-se tubos PVC, com diâmetro de $1\frac{1}{2}$ ” cada e 15 cm de comprimento, localizados em duas pontas opostas do tanque, construídos manualmente, fechados na base por um pequeno cilindro de madeira (Figura 3.4 - A), semelhante a um medidor de nível d’água. Foram feitos três cortes nos tubos para permitir a entrada de água e assim analisar a posição do nível de água na caixa. Além disso, os tubos foram envolvidos com geotêxtil para evitar a entrada de partículas da areia no tubo. A verificação do nível de água foi feita através da inspeção visual (Figura 3.4 - B).

Figura 3.4: Em A nota-se aparato artesanal usado no controle da saturação. Em B, tem-se o mesmo inserido na areia do tanque.

3.3 Construção do suporte de eletrodos

Denomina-se aqui suporte de eletrodos o aparato que abrange a plataforma de eletrodos e a viga central de madeira. A plataforma de eletrodos consiste em placas de material inerte, que nesse caso são placas de PVC, na qual os eletrodos foram dispostos e conectados, conforme o arranjo solicitado (Figura 3.5 - A). Essa plataforma não deve estar em contato direto com a areia, para evitar a formação de campos elétricos em lâminas de água, estabelecidos pelo contato da placa com a areia.

Essas lâminas podem influenciar nos valores finais da resistividade aparente. Para minimizar esse efeito, foram fixados em cada canto da plataforma pequenos blocos de isopor de 2,5 cm de altura, fazendo com que o contato placa/areia seja menor possível e não condutivo (Figura 3.5 - B).

Figura 3.5: Em A, tem-se plataforma de eletrodos construída em placas de PVC. Em B, detalhe para os blocos de isopor na base da placa de PVC.

Na parte central e superior do tanque, encontra-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 3.6 e 3.7-A). No centro dessa viga encontra-se fixado um transferidor de ângulos de acrílico, 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 (Figura 3.6 e 3.7-B).

Essa haste tem movimentação livre e tem como função unir esses dois elementos (plataforma + viga de madeira) de forma a girar a plataforma de eletrodos quando for necessário variar o azimute para a medida de eletrorresistividade aparente.

Figura 3.6: Esquema da estrutura do tanque usado no experimento em planta e perfil.

Figura 3.7: Em A, viga central de madeira e transferidor de ângulos. Já em B, indicado pela seta vermelha, haste de plástico.

3.4 Execução dos ensaios de eletrorresistividade

Após a preparação do tanque, montagem do modelo reduzido e construção da plataforma de eletrodos, iniciaram-se os levantamentos de eletrorresistividade. Foi utilizado o método de levantamento eletrorresistivo azimutal, conforme descrito no capítulo 2. Optou-se por usar incrementos de ângulos a cada 15° , totalizando 360° . Porém como o método de eletrorresistividade azimutal é simétrico, realizam-se medidas do azimute 0° até o 165° .

Consequentemente, foram feitas 12 leituras de corrente elétrica injetada e coletadas 12 medidas do potencial gerado para cada tipo de arranjo utilizado e posteriormente os valores foram repetidos para os azimutes entre 180° e 345° . É importante destacar que todas as direções das descontinuidades simuladas foram consideradas como correspondentes ao azimute 0° .

Para os levantamentos eletrorresistivos azimutais empregou-se um resistímetro de corrente contínua (da Auto Energia, modelo X5), dois multímetros digitais modelo ET2042D da Minipa, uma bateria de 12V e quatro eletrodos de aço inoxidável de 9,5 cm de comprimento e 0,25 cm de diâmetro, dois para injetar corrente elétrica no sistema e dois para medir potencial (Figura 3.8 - A, B, C e D). Os eletrodos foram conectados na plataforma de eletrodos de acordo com o arranjo escolhido e, com auxílio de cabos,

foram conectados no resistivímetro para enviar corrente ao sistema e medir as diferenças de potencial, cujas leituras foram feitas nos dois multímetros digitais.

Figura 3.8: Em A, resistivímetro da marca Auto Energia, modelo X5. Em B, multímetro digital ET2042D da Minipa. Já em C, bateria. Por fim em D, eletrodos de aço utilizados nas medições.

Essa fase do experimento foi dividida em quatro etapas. A primeira delas foi realizada com a simulação de uma descontinuidade posicionada na parte central do modelo, de aproximadamente 5 mm de espessura, completamente preenchida por areia média. O encontro entre as outras placas de mármore também garantem uma condição de anisotropia do maciço, pois reproduzem descontinuidades fechadas, com aberturas de aproximadamente 0,5 mm (Figura 3.9 - A), que não foram preenchidas com areia. Sobre o maciço descontinuo, foi colocada 1,8 cm da areia média, saturada com água.

A etapa 2 foi executada com as mesmas condições de anisotropia da etapa 1, porém se dispôs sobre o maciço 5 cm da areia. A etapa 3 também apresentava as mesmas condições de anisotropia das etapas anteriores, contudo a espessura de areia sobre o maciço foi de 8 cm. Para essas três etapas foram usadas 25 placas de mármore lisas de 2 cm de espessura e 20 cm de altura (Figura 3.9 - A).

Por fim, na quarta e última etapa utilizaram-se 20 placas de mármore e por todo o modelo distribuíram-se descontinuidades de 5 mm cada, completamente preenchidas pela areia média, localizadas entre cada placa, totalizando 19 descontinuidades (Figura 3.9 - B). Sobre o maciço, nessa etapa, distribuiu-se 5 cm de areia média saturada.

Figura 3.9: Em A, modelo reduzido com uma descontinuidades central de 5 mm. Em B, modelo utilizado na etapa 4, com descontinuidades de 5 mm distribuídas por todo maciço

Vale lembrar que a areia não tem somente a função de sustentar o maciço rochoso no tanque. Esse material também tem por função simular a espessura de solo sobre o maciço rochoso em diversas situações, semelhante ao que se encontra na natureza, quando o solo se encontra saturado. Nas áreas de clima mais úmidos com rochas carbonáticas, o solo muitas vezes se encontra saturado próximo ao contato com a rocha. Por isso, foi conveniente simular espessuras de solos distintas para entender o comportamento dessas variações sobre a aquisição de dados e os resultados dos levantamentos. Em trabalhos futuros pretende-se analisar a influência de solos não saturados.

Para as quatro situações foram utilizados os arranjos Wenner, Dipolo-dipolo Equatorial, Quadrático, Schlumberger e Dipolo-dipolo, sendo para os quatro primeiros usado a técnica azimutal e o último o caminhamento elétrico convencional. Em todos os levantamentos foram mensurados três valores da corrente injetada e do potencial gerado para cada azimute e após, realizou-se a média aritmética desses valores. Posteriormente, utilizando-se o fator geométrico (fator K) referente a cada tipo de arranjo, calculou-se a resistividade aparente.

Esses dados e os azimutes correspondentes a eles foram plotados em gráficos polares, utilizando o software *Grapher* da Golden, gerando assim as elipses de eletrorresistividade aparente. A seguir, esses arranjos serão melhor descritos.

3.4.1 Arranjo Wenner

No levantamento eletrorresistivo azimuthal, utilizando o arranjo Wenner foram adotados quatro espaçamentos distintos entre os eletrodos, sendo esses de 4 cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm para todas as quatro etapas realizadas na pesquisa (Figura 3.10). Posteriormente, seguiu-se com as medições de eletrorresistividade azimuthal segundo procedimentos citados no item 3.4.

Figura 3.10: Disposição do arranjo Wenner no levantamento eletrorresistivo azimuthal.

3.4.2 Arranjo Dipolo-dipolo equatorial

Para o arranjo Dipolo-dipolo equatorial foram utilizados três espaçamentos distintos entre os eletrodos, sendo eles 2 cm, 3 cm e 4 cm. Conforme se aumenta os espaçamentos entre os dipolos (AB e MN), a distância entre os dipolos AB e MN também aumenta. Nesse caso, utilizou-se o fator multiplicador de 5, sendo então as distâncias entre os dois dipolos de 10 cm, 15 cm e 20 cm, correspondente aos

espaçamentos de 2 cm, 3 cm e 4 cm, respectivamente (Figura 3.11). Assim como no arranjo Wenner, os levantamentos seguiram o método da técnica azimutal.

Figura 3.11: Disposição do arranjo Dipolo-dipolo equatorial no levantamento eletrorresistivo azimutal.

3.4.3 Arranjo Quadrático

Assim como no arranjo Wenner, utilizaram-se nesse caso, os espaçamentos entre os dipolos de 4 cm, 6 cm, 8 cm e 10 cm (Figura 3.12). Para cada espaçamento considerado foram feitas duas medições, denominadas alfa (α) e beta (β), que são perpendiculares entre si. Na configuração α , os dados coletados correspondem aos azimutes de 0° a 75° e para a configuração β os dados estão compreendidos entre 90° e 165° , conforme Lane *et. al.* (1995) (Capítulo 2). Vale lembrar que os valores de eletrorresistividade aparente no azimute 180° são iguais aos do azimute 0° , sendo assim desnecessário efetuar medidas nessa posição.

Figura 3.12: Disposição do arranjo Quadrático no levantamento eletrorresistivo azimuthal.

3.4.4 Arranjo Schlumberger

Foi realizado somente um levantamento azimuthal com o arranjo Schlumberger, utilizando o espaçamento entre os dipolos MN de 4 cm e o espaçamento entre os dipolos AB de 20 cm (tamanho total do arranjo), pois espaçamentos maiores extrapolariam os limites de medição aceitáveis do tanque (30%), segundo Goudswaard (1957) (Figura 3.13).

Figura 3.13: Disposição do arranjo Schlumberger no levantamento eletrorresistivo azimuthal.

3.4.5 Arranjo Dipolo-dipolo

Esse arranjo foi empregado com o objetivo de verificar a existência da anisotropia elétrica e complementar os resultados da técnica azimutal, além de construir seções de eletrorresistividade. Esse levantamento, diferentemente dos anteriores, foi feito por caminhamento elétrico. Decidiu-se fazer as medições em três linhas ao longo do modelo, denominadas perfis, espaçadas entre si de 12 cm, estando uma localizada no centro do modelo e as outras duas a direita e a esquerda desta (Figura 3.14).

Figura 3.14: Esquema, em planta, do caminhamento elétrico com arranjo Dipolo-dipolo e os respectivos perfis levantados. Linhas vermelhas representam a direção das descontinuidades.

Os eletrodos AB e MN, nesse caso, estavam espaçados entre si de 4 cm e a primeira medição do levantamento se dá a esta distância. Posteriormente, move-se os dipolos MN de uma distância de 4 centímetros, ficando AB e MN distanciados de 8 cm. Esse procedimento é repetido até AB e MN ficarem separados de 16 centímetros. Segue-se o levantamento, movendo AB para a direita em 4 cm e iniciando todo o processo

descrito acima. Dessa forma, se produz 4 níveis de investigação. Esse procedimento é embasado nas recomendações de Braga (2007) apresentadas no capítulo 2.

Figura 3.15: Em A nota-se as três linhas do levantamento Dipolo-dipolo. Em B, configuração do levantamento eletrorresistivo Dipolo-dipolo.

3.5 Caracterização dos materiais empregados

3.5.1 Caracterização da areia

Primeiramente, foi realizado um ensaio de análise granulométrica com o intuito de classificar a areia utilizada para evitar nomenclaturas equivocadas. Essa fase foi regida segundo a norma brasileira NBR 7181 (ABNT, 1984). É necessário ressaltar que realizou-se somente o ensaio de peneiramento (fino e grosso), já que visualmente o conteúdo de silte e argila era baixo.

Além disso, foi medida a resistividade elétrica da areia, para que posteriormente comparações com os valores obtidos nos levantamentos eletrorresistivos fossem confrontados. Sendo assim, foi empregado um arranjo com configuração mais simples e que obtém resultados precisos. Optou-se pelo arranjo Wenner, com espaçamento entre os eletrodos de 2 cm (Figura 3.16).

Esse espaçamento garante que a resistividade aparente medida atinja em torno de 1 cm de profundidade (profundidade teórica), não sofrendo interferência de outros materiais localizados em profundidade maiores. Posicionaram-se os eletrodos nas quatro

extremidades do tanque, onde só se encontra areia saturada, sem interferência do maciço. Prosseguiu-se realizando um levantamento geoeletrico convencional, com quatro eletrodos; dois de corrente e dois de potencial.

Figura 3.16: Levantamento da eletrorresistividade da areia pelo arranjo Wenner.

3.5.2 Caracterização da rocha

Essa fase do ensaio utilizou-se os mesmos equipamentos usados nos levantamentos eletrorresistivos azimutais. Além desses materiais, utilizou-se 3 placas de mármore saturadas e em cima delas colocou-se os eletrodos com o arranjo Wenner, espaçamento 2 cm (Figura 3.17). Foi feita somente uma medição, em uma só posição, sendo suficiente para aferir a resistividade do mármore.

Além disso, usou-se HCl diluído para determinar a reatividade do mármore. Outras descrições foram feitas como a granulação da rocha, cor e peso, usando inspeção visual e balança apropriada, respectivamente.

Figura 3.17: Ensaio para medir a resistividade das placas de mármore.

3.5.3 Caracterização da condutividade elétrica da água

Para adquirir os dados da condutividade elétrica da água utilizou-se um multiparâmetro portátil (Minipa 6P), um béquer de 100 ml e uma pequena seringa (Figura 3.18 - A e B). A determinação foi feita em amostra da solução usada para a saturação do modelo. Essa solução consiste em água não deionizada e os elementos eventualmente solubilizados da areia e da rocha.

Figura 3.18: Tem-se em A, multiparâmetro utilizado para determinar condutividade elétrica da água. Já em B, amostra da água coletada.

Com auxílio de seringa, foram coletadas amostras de quatro pontos no tanque posteriormente transferidas para um béquer para homogeneização. Ainda com a seringa, cerca de 5 ml da solução foi coletada do béquer e colocada no pequeno compartimento localizado na parte superior do multiparâmetro e por fim foi realizada a medida da condutividade elétrica.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Apresentação dos resultados

4.1.1 Análise dos materiais empregados

O ensaio de análise granulométrica da areia de acordo com a NBR 7181/1984, permitiu gerar a curva granulométrica da Figura 4.1. Sendo assim, a curva granulométrica mostra que 3,48% é pedregulho, menos de 10% é silte e argila e 86,42% do material está compreendido na faixa areia. Desse valor, 24% é areia fina, 43% é areia média e 10% é areia grossa, segundo NBR-6502 (1995), sendo classificada como areia média (Anexo XXXV).

A análise do solo também pode ser feita pela Classificação Unificada dos Solos, que nesse caso apresentou 86,42% do material retido na peneira número 200, classificando o solo como pedregulhos ou areias. Tendo em vista que a percentagem passante na peneira número 4 foi maior que 50%, entra na fração areias. Por essa classificação e pelos coeficiente de uniformidade (C_u) e curvatura (C_c), tem-se que o material é uma areia bem graduada. Para encerrar, o solo será chamado nessa pesquisa de areia média bem graduada.

Figura 4.1: Curva granulométrica resultado do ensaio de granulometria realizado na areia utilizada no experimento, segundo NBR 7181/1984.

Já a caracterização geolétrica da areia saturada, feita conforme procedimento do item 3.5.1, forneceu valores de resistividade aparente de 156,76 ohm.m. Quanto a condutividade da água, o multiparâmetro forneceu o valor de 53,14 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que corresponde a resistividade de aproximadamente $1,88 \times 10^2$ ohm.m.

Já a resistividade da rocha foi de 3289,15 ohm.m, conforme medição em laboratório descrita no item 3.5.2, valor aproximadamente 20 vezes à do solo. Petrograficamente, o mármore é calcítico, pois efervesce na presença de HCl, sem a necessidade de pulverizá-lo. Além disso, é de cor branca, possui densidade de $3130 \text{ Kg}/\text{m}^3$, granulação média e não se encontra alterado.

4.1.2 Profundidades médias de investigação

Com base no trabalho de Loke (1999), foram obtidas as profundidades médias de investigação para todos os arranjos utilizados nos levantamentos dessa pesquisa em função do comprimento total do arranjo (Tabela 4.1). Notar que para o arranjo Quadrático, foi empregada a relação de equivalência de tamanho do lado do quadrado, usando como referência o arranjo Wenner conforme descrito no item 2.3.6 .

Tabela 4.1: Profundidades médias de investigação para os arranjos usados em função do comprimento (L) ou espaçamento inter-eletrodo (a).

Arranjo	Espaçamento (cm)	Espaçamento L (cm)	Z/a	Z/L	Profudidade Média (cm)
Wenner	4	12	0,519	0,173	2,076
	6	18			3,114
	8	24			4,152
	10	30			5,19
Quadrático	5,3	21,2	0,519	0,173	3,6676
	8	32			5,536
	10,67	42,68			7,38364
	13,34	53,36			9,23128
Dipolo-dipolo equatorial	2	10	0,451	0,319	3,19
	3	15			4,785
	4	20			6,38
Dipolo-dipolo	4	24	0,416	0,139	3,336
Schlumberger	4	20	0,52	0,173	3,46

Por essa relação, observa-se que os espaçamentos do arranjo Quadrático equivalentes ficam maiores que os usados nos levantamentos em laboratório e nesse caso deve-se

usar o fator profundidade do arranjo Wenner, visto que a equivalência foi feita por esse arranjo (Tabela 4.1). Para os demais arranjos não é necessária a equivalência.

Sendo assim, usando a relação Z/L da Tabela 4.1, onde L é o comprimento total do arranjo e Z a profundidade média, chega-se aos valores de alcance de investigação para cada arranjo usado neste trabalho. Nota-se que o arranjo Quadrático alcança as maiores profundidades, lembrando que é uma profundidade média equivalente. Isso indica que as profundidades reais para cada medição podem ser maiores ou menores que as apresentadas na Tabela 4.1.

4.1.3 Levantamentos com arranjo Dipolo-dipolo

Após o tratamento dos dados no *software Surfer*, verificou-se que para as profundidades teóricas de 8 e 10 centímetros os resultados não se apresentaram satisfatórios devido ao menor número de dados gerados, que dificulta a interpolação no programa *Surfer*.

Visto isso, foram usados somente os dados das profundidades teóricas de 4 e 6 centímetros (Anexos XXXI, XXXII, XXXIII e XXXIV). A Figura 4.2 traz as seções colorpéticas de resistividade aparente do levantamento Dipolo-dipolo para a etapa 1. Como era de se esperar, na profundidade teórica de 4, os valores de resistividade aparente são menores que na profundidade de 6, pois esse alcança menor profundidade de investigação, com o campo elétrico concentrado principalmente na areia. Além disso, verifica-se que há uma tendência de baixa resistividade aparente no azimuth zero, coincidindo com a orientação das discontinuidades, comprovando que a eletrorresistividade é capaz de detectar condições anisotrópicas em maciços rochosos.

A sequência de Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 mostram os resultados do levantamento Dipolo-dipolo para as etapas 2, 3 e 4, respectivamente. Assim como na etapa 1, nas etapas 2, 3 e 4, os valores de resistividade aparente são menores na profundidade teórica de 4 cm do que na profundidade de 6 cm. Além disso, é importante observar que em todas as situações ocorrem uma concentração de valores intermediários na região central, representados pelas cores verde e amarela, sugerindo um alinhamento nessa direção, onde exatamente se localizam as discontinuidades simuladas no modelo.

Figura 4.2: Seção de pseudo-resistividade aparente no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 1.
Em A espaçamento entre eletrodos de 4 cm e em B, de 6 cm.

Figura 4.3: Seção de pseudo-resistividade aparente no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 2.
Em A espaçamento entre eletrodos de 4 cm e em B, de 6 cm.

Figura 4.4: Seção de pseudo-resistividade aparente no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 3.
Em A espaçamento entre eletrodos de 4 cm e em B, de 6 cm.

Figura 4.5: Seção de pseudo-resistividade aparente no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 4.
Em A espaçamento entre eletrodos de 4 cm e em B, de 6 cm.

É possível notar, nessas seções, que em alguns pontos aparecem valores de resistividade menores ou maiores, concentrados especialmente nas extremidades, representados pela cor azul e vermelha, nessa ordem. Esse fato ocorre provavelmente pela concentração desigual de água acumulada no tanque, devido a um pequeno desnível verificado na

bancada de trabalho. Além do mais, como os levantamentos não foram realizados todos nos mesmos dias, é provável que a saturação não tenha sido completamente igual em todos os levantamentos. Contudo, de maneira geral, esse arranjo foi capaz de detectar a presença das descontinuidades.

4.1.4 Levantamentos eletrorresistivos azimutais

A seguir, serão apresentados os dados obtidos em cada uma das quatro etapas descritas no capítulo 3. Verificou-se, de maneira geral, que os resultados mostraram boa precisão, embora tenham sido tomados com eletrodos polarizáveis. Os resultados dos levantamentos serão apresentados em gráficos cartesianos e na forma de elipses de resistividade aparente, ambos relacionando a resistividade aparente com o azimute. Nas elipses é importante observar a coincidência ou não do eixo maior de resistividade com a direção das descontinuidades, na posição 0°. Se for coincidente para os arranjos colineares, indica a ocorrência do paradoxo de anisotropia. Foram usados, para as quatro etapas, os arranjos Wenner, Schlumberger, Quadrático e Dipolo-dipolo Equatorial, também com espaçamentos distintos entre os eletrodos.

4.1.5 Etapa 1

Nessa etapa, colocou-se 1,8 centímetros de areia sobre o maciço, para simular a influência de uma delgada cobertura de solo. O modelo foi composto por 25 placas de mármore lisas justapostas, gerando 23 descontinuidades verticais fechadas, com abertura de aproximadamente 0,5mm e uma descontinuidade no centro do maciço de 5 mm de abertura, vertical, completamente preenchida com a areia saturada, totalizando 24 descontinuidades.

4.1.5.1 *Arranjo Wenner*

A Figura 4.6 mostra os gráficos de resistividade aparente (ohm.m) *versus* azimute para os espaçamentos entre eletrodos de 4, 6, 8 e 10 centímetros. É possível notar, que conforme se aumenta o espaçamento entre os eletrodos, os valores de resistividade

aparente também aumentam, ou seja, o levantamento atinge maiores profundidades. Assim, a resistividade aparente se aproxima do valor esperado para a rocha.

Além do mais, é possível observar que no azimute $0^\circ/180^\circ$ ocorre uma diminuição no valor da resistividade aparente (Figura 4.6). Espera-se que esta resposta ocorra onde as descontinuidades estão presentes, coincidentes com a sua direção das descontinuidades, indicando um aumento na condutividade elétrica. Ainda pode-se notar que a resistividade aumenta gradativamente até atingir o maior valor de resistividade aparente no azimute $90^\circ/270^\circ$, posição perpendicular às descontinuidades.

Figura 4.6: Curvas de resistividade aparente *versus* azimutes para o arranjo Wenner, usando quatro espaçamentos distintos (em cm), etapa 1.

Nesse levantamento, para todos os espaçamentos, o método conseguiu atingir sempre o maciço rochoso, pois a profundidade média para o espaçamento máximo usado, (Tabela 4.1) foi de 5,19 cm e para o mínimo foi de 2,07 cm, ultrapassando sempre a espessura de solo.

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram as elipses de resistividade aparente para os quatro espaçamentos com o arranjo Wenner, usando uma mesma escala para todos (escala de menor detalhe) e uma outra, de maior detalhe, respectivamente. Nas elipses plotadas na escala de menor detalhe, observa-se uniformidade em toda elas, com exceção da diminuição de resistividade no azimute $0^\circ/180^\circ$, semelhante ao que ocorre nas curvas do gráficos da Figura 4.6.

Esse fato mostra que a anisotropia maior foi detectada exatamente no ponto de inflexão mais forte, onde se encontra a descontinuidade central, apesar de existirem outras descontinuidades mais delgadas na mesma direção da central. Na escala de maior detalhe é possível notar maiores variações da resistividade aparente, porém, ainda na posição $0^\circ/180^\circ$ nota-se os menores valores de resistividade. Em nenhum dos casos foi identificado o paradoxo da anisotropia.

Figura 4.7: Elipses de resistividade aparente, escala de menor detalhe, para o arranjo Wenner, para espaçamentos entre eletrodos de 4 cm (A), 6 cm (B), 8 cm (C) e 10 cm (D).

Figura 4.8: Elipses de resistividade aparente, escala de maior detalhe, para o arranjo Wenner, para espaçamentos entre eletrodos de 4 cm (A), 6 cm (B), 8 cm (C) e 10 cm (D).

4.1.5.2 Arranjo Quadrático

As curvas da Figura 4.9 mostram os valores da resistividade aparente *versus* azimuth para o arranjo Quadrático, com os espaçamentos entre eletrodos de 4, 6, 8 e 10 centímetros. Assim como no arranjo Wenner, a medida que se aumenta o espaçamento entre os eletrodos, os valores de resistividade aparente também aumentam, indicando que em profundidades maiores os valores de resistividade sofrem a influência da resistividade das placas de mármore, cujo valor é 3289,15 ohm.m. Todas as quatro curvas apresentam o mesmo padrão, indicando que o aumento do espaçamento só interferiu na profundidade de investigação.

Figura 4.9: Curvas de resistividade aparente *versus* azimutes para o arranjo Quadrático, usando quatro espaçamentos a de 4, 6, 8 e 10 cm, etapa 1.

O arranjo conseguiu atingir sempre o maciço rochoso, pois esse é capaz de alcançar maiores profundidades médias dentre os arranjos usados na pesquisa (Tabela 4.1). A profundidade no maior espaçamento foi de 9,23 cm e no menor foi de 3,66 cm, ultrapassando sempre a espessura de solo, ou seja, o arranjo foi capaz de investigar parcelas consideráveis da rocha.

As elipses de resistividade aparente plotadas na mesma escala (Figura 4.10) mostram que para todos os espaçamentos o eixo menor da elipse se encontra próximo ao azimute 0° e o eixo maior está posicionado no azimute de 90° . Deve-se também ressaltar que conforme se aumenta o espaçamento dos eletrodos o tamanho da elipses também aumenta, fato que confirma que a profundidade de investigação também aumentou e foi capaz de atingir maiores detalhes.

Figura 4.10: Elipses de resistividade aparente, escala de menor detalhe para o arranjo Quadrático, espaçamentos entre eletrodos de 4cm (A), 6 cm (B), 8 cm (C) e 10 cm (D).

Pelas elipses de resistividade aparente da Figura 4.11 nota-se que a anisotropia elétrica está presente em todos os espaçamentos usados, pois os contornos das mesmas são irregulares, mostrando valores menores ou maiores de resistividade aparente com a direção. Pode-se observar também uma redução no valor da resistividade aparente, ocorrendo próximo ao azimuth $0^\circ/180^\circ$, coincidente com a direção das discontinuidades.

Figura 4.11: Elipses de resistividade aparente, escala de maior detalhe para o arranjo Quadrático, espaçamentos entre eletrodos de 4cm (A), 6 cm (B), 8 cm (C) e 10 cm (D).

4.1.5.3 Arranjo Dipolo-dipolo equatorial

As resistividades aparentes encontradas para esse arranjo foram as maiores encontradas entre todos os arranjos usados na etapa 1 e bem próximas da resistividade da rocha. Convém observar que a variação dos valores de resistividade entre os espaçamentos usados nesse arranjo é menor da que ocorre nos outros arranjos (Figura 4.12). Esse fenômeno ocorre provavelmente devido a diferença na geometria desse arranjo, que pode aumentar o alcance lateral, sofrendo maior interferência da areia que recobre o maciço.

Para os espaçamentos de 2 cm e 3 cm pode-se notar que o maior valor de resistividade aparente é coincidente com o azimute $90^\circ/270^\circ$, que é perpendicular à descontinuidade central de 5 mm. Contudo, para o espaçamento de 4 cm o maior valor de resistividade aparente não corresponde ao azimute 90° e sim é coincidente com a posição de 135° . Porém, é notável que na região do azimute de 90° também ocorrem valores altos,

coincidentes com os maiores valores dos espaçamentos de 2 e 3 centímetros (Figura 4.12).

Figura 4.12:Curvas de resistividade aparente *versus* azimutes para o arranjo DDE, para três espaçamentos (2, 3 e 4 cm), etapa 1.

Assim como nos arranjos anteriores, para todos os espaçamentos usados o método foi capaz de atingir sempre o maciço rochoso pois a profundidade média de investigação foi de no mínimo é de 3,19 cm (para $a=2$ cm). Porém em todos os espaçamentos, os valores da resistividade aparente foram influenciados pela cobertura de solo.

Pode-se notar, tanto pelo gráfico da Figura 4.12 quanto pelas elipses de resistividade aparente (Figuras 4.13 e 4.14), que para o espaçamento de 4 cm obteve-se maior variação nos valores de resistividade aparente se comparados aos outros dois e que o padrão de distribuição de resistividade é diferente. Esse fato pode ter sido causado pelo efeito de borda do tanque e a areia localizada ao redor do modelo, pois este arranjo com um maior espaçamento permite maior alcance lateral e vertical que os outros.

Figura 4.13: Elipses de resistividade aparente, menor escala, para o arranjo DDE. Em A tem-se a elipses para o espaçamento de 2 cm, seguida de B para espaçamento de 3 cm. Em C, espaçamentos de 4 cm .

Figura 4.14: Elipses de resistividade aparente, escala de maior detalhe, para o arranjo DDE. Em A tem-se a elipses para o espaçamento de 2 cm, seguida de B para espaçamento de 3 cm. Em C, espaçamentos de 4 cm .

4.1.5.4 Arranjo Schlumberger

Como nesse arranjo usou-se somente um espaçamento ($MN = 4$ cm e $AB = 20$ cm), a análise só foi feita em relação à sensibilidade de detecção da resistividade aparente, à anisotropia elétrica e à profundidade de investigação, não ocorrendo comparações com espaçamentos distintos. Nota-se pelo gráfico da Figura 4.15 que ocorre uma diminuição da resistividade, semelhante a que ocorreram no arranjo Wenner, exatamente na posição $0^\circ/180^\circ$, local onde se localiza a descontinuidade central.

Ainda convém observar que os valores de resistividade aparente medidos variam de 876,98 ohm.m e 728,78 ohm.m, menores valores encontrados para essa etapa entre todos os arranjos estudados. A profundidade de investigação é de 3,46 cm, o que mostra que o arranjo alcança porções do maciço rochoso.

Figura 4.15: Curvas de resistividade aparente *versus* azimutes para o arranjo Schlumberger na etapa 1.

Nota-se ainda, pela elipse de resistividade aparente da Figura 4.16 - A, que o eixo menor da elipse, ainda que sutil devido a escala, se encontra na posição $0^\circ/180^\circ$ e o eixo maior, no azimute $90^\circ/270^\circ$, fato confirmado na elipse da Figura 4.16 - B (escala de maior detalhe). É conveniente ressaltar que nesse caso a pequena variação nos valores da resistividade aparente mostra que esse arranjo não é capaz de medir a anisotropia elétrica com grande acurácia como nos outros arranjos já estudados. Esse fato é corroborado pelo aspecto da elipse da Figura 4.16 - A.

Figura 4.16: Em A, elipse de resistividade aparente em escala de menor detalhe e em B, elipse de resistividade aparente na escala de maior detalhe.

4.1.6 Etapa 2

Os ensaios dessa etapa objetivaram avaliar a influência de uma espessura maior do solo sobre o maciço. Logo, para a etapa 2, foi colocada sobre o maciço a mesma areia da etapa anterior, porém dessa vez com espessura de 5 cm. Manteve-se a mesma disposição entre as placas de mármore e as discontinuidades.

4.1.6.1 Arranjo Wenner

A Figura 4.17 mostra a série de curvas de resistividade aparente (ohm.m) *versus* azimuth para os espaçamentos entre eletrodos de 4, 6, 8 e 10 centímetros. Assim como na etapa 1, os valores de resistividade aparente aumentam conforme se aumenta o espaçamento entre os eletrodos. Isto sugere que em profundidades maiores os valores de resistividade aparente vão se aproximando da resistividade aparente das placas de mármore, além de alcançarem maiores profundidades de investigação.

Comparado com a etapa 1, nota-se que os valores de resistividade aparente diminuíram. Esse fato pode ser explicado pela influência do aumento na espessura da areia média saturada, que possui um valor de resistividade de 156,76 ohm.m. Certamente essa ocorrência contribui para que o valor das resistividades aparentes, nessa etapa, sejam menores que na etapa 1 (Figura 4.17).

Figura 4.17: Curvas de resistividade aparente *versus* azimuthes para o arranjo Wenner, usando quatro espaçamentos de 4, 6, 8 e 10 cm, etapa 2.

As elipses de resistividade aparente dos quatro levantamentos realizados, com os espaçamentos diferentes, apresentadas em escala de menor detalhe na Figura 4.18 - A, B, C e D, mostram um padrão quase circular, com pouca variação nos valores de resistividade aparente.

Figura 4.18: Elipses de resistividade aparente, escala de menor detalhe, para o arranjo Wenner, para espaçamentos entre eletrodos de 4cm (A), 6 cm (B), 8 cm (C) e 10 cm (D). Etapa 2.

A explicação para essa situação está no alcance da profundidade média de investigação. Para o arranjo Wenner, de acordo com a Tabela 4.1, somente no espaçamento de 10 cm seria possível alcançar a rocha. Porém, os levantamentos sofrem grande interferência da cobertura de areia, tornando o contorno das elipses, para os outros espaçamentos de eletrodos, mais uniformes. Nota-se que, para os espaçamentos maiores, as elipses detectam claramente as discontinuidades, principalmente a central (Figura 4.19), pois é possível notar uma redução no valor da resistividade aparente no azimuth $0^\circ/180^\circ$.

Esse azimuth coincide com a localização e direção da discontinuidade central de 5 mm (Figura 4.19 - C e D) e caracterizam assim o eixo menor das elipses. Nota-se, portanto,

que nesse caso o levantamento azimuthal funcionou muito bem para os espaçamentos maiores. Ainda é importante ressaltar, que em nenhum dos casos ocorre o paradoxo de anisotropia.

Figura 4.19: Elipses de resistividade aparente, escala de maior detalhe, para o arranjo Wenner, para espaçamentos entre eletrodos de 4 cm (A), 6 cm (B), 8 cm (C) e 10 cm (D). Etapa 2.

4.1.6.2 Arranjo Quadrático

Nota-se pelas curvas da Figura 4.20 que os levantamentos usando o arranjo Quadrático se comportam de forma similar em todos os espaçamentos empregados, diferindo somente no espaçamento de 4 cm. Notar também que para todos os espaçamentos as elipses de resistividade sofrem deslocamentos, não estando seu eixo maior na mesma direção das discontinuidades (Figuras 4.21 e 4.22). Como exemplo tem-se as elipses para o espaçamento de 4 cm. O eixo maior está localizado no azimuth de $150^{\circ}/330^{\circ}$, comportamento não esperado para esse modelo.

Para os outros espaçamentos a tendência é análoga entre si, se tornando diferente somente na questão da profundidade média de investigação: quanto maior o espaçamento entre os eletrodos, maior a profundidade de investigação e maior o valor da resistividade aparente (Figura 4.20). De acordo com a Tabela 4.1 somente o espaçamento de 4 cm não alcança o maciço (profundidade média de 3,66 cm), porém, nota-se que a areia influencia na resistividade aparente gerada no levantamento.

É importante destacar que, comparando-se com o comportamento desse arranjo com o da etapa 1, os valores de resistividade aparente medidos diminuíram, atestando mais uma vez a influência que a areia saturada estabelece sobre o levantamento de eletrorresistividade (Figura 4.20).

Figura 4.20: Curvas de resistividade aparente *versus* azimutes para o arranjo Quadrático, usando quatro espaçamentos distintos, etapa 2.

A análise das elipses de resistividade aparente mostra, tanto na escala de menor detalhe quanto na de maior detalhe, que o eixo maior está próximo ao azimute 0°/180° (Figuras 4.21 e 4.22), o que não é esperado para esta situação, visto que a localização da descontinuidade principal está nessa posição. Esse fato mostra uma tendência ao paradoxo de anisotropia. Contudo, segundo Pergavo *et al.* (2001), o paradoxo ocorre somente nos arranjos colineares, desconsiderando assim a ocorrência nesse caso.

Figura 4.21: Em A, elipse para o espaçamento de 4 cm, seguida de B para espaçamento de 6 cm. Em C e D, espaçamentos de 8 cm e 10 cm, respectivamente. Ambos arranjo Quadrático. Escala de menor detalhe. Etapa 2.

Figura 4.22: Em A, elipse para o espaçamento de 4 cm, em B para espaçamento de 6cm. Já em C e D, espaçamentos de 8 cm e 10 cm, respectivamente. Arranjo Quadrático na escala de maior detalhe. Etapa 2.

4.1.6.3 Arranjo Dipolo-dipolo equatorial

Assim como na etapa 1, ao se aumentar o espaçamento entre os dipolos ocorre também aumento nos valores da resistividade aparente. Esse episódio acontece de forma bem expressiva nos espaçamentos de 2 e 3 cm, apresentando comportamentos similares. Convém observar que os maiores valores de resistividade aparente estão próximos ao azimute $90^\circ/270^\circ$ (Figura 4.23).

Figura 4.23: Curvas de resistividade aparente *versus* azimutes para o arranjo DDE para os três espaçamentos entre eletrodos utilizados.

Para os mesmos espaçamentos o valor mínimo de resistividade aparente se encontra no azimute de 45°. Esse comportamento gera certa estranheza, visto que os menores valores não estão à 90° dos maiores e não coincidem com a posição da descontinuidade central de 5 mm, como era de se esperar. Esse fato é confirmado pelas elipses de resistividade aparente apresentadas nas Figura 4.24 - A e B e Figura 4.25 - A e B. Ambos apresentam valores de resistividade aparente maiores próximos ao azimute 90°, porém existem regiões nas elipses que também apresentam valores altos. Sendo assim, é conveniente considerar esses valores como anomalias.

Para o espaçamento de 4 cm, tanto no gráfico 4.23 quanto nas Figuras 4.24 - C e 4.25 - C, percebe-se um comportamento distinto, onde os menores valores de resistividade aparente estão posicionados próximos ao azimute 0°/180°, em conformidade com o azimute da descontinuidade central. Perpendicularmente, encontra-se o maior valor de resistividade aparente para o espaçamento de 4 cm, que é da ordem de 2459,23 ohm.m.

Novamente, ocorre nesse arranjo um decréscimo nos valores de resistividade aparente em relação a etapa 1, devido a influência da presença de areia saturada sobre o modelo, indicando que o levantamento está registrando uma resistividade combinada da maciço rochoso + areia saturada.

Figura 4.24: Em A e B, elipses de resistividade aparente para os espaçamentos de 2 e 3 cm, arranjo DDE. Em C, elipse de resistividade aparente para o espaçamento de 4 cm. Escala de menor detalhe. Etapa 2.

Na escala de maior detalhe é possível observar que para os espaçamentos de 2 e 3 centímetros o padrão das elipses são um pouco anormais, mostrando algumas anomalias no azimuth 75° . No caso da elipses da Figura 4.25- B fica um pouco difícil definir qual é o eixo maior e o menor. Porém, na escala de menor detalhe, esse efeito é suavizado, permitindo determinar a localização dos eixos. Para o espaçamento de 4 centímetros, em ambas as escalas, o eixo menor está localizado na região do azimuth $0^\circ/180^\circ$, como é o esperado (Figuras 4.24 e 4.25).

Figura 4.25: Em A e B, elipses de resistividade aparente para os espaçamentos de 2 e 3 cm. Em C, elipse de resistividade aparente para o espaçamento de 4 cm. Ambos arranjo DDE. Escala de maior detalhe. Etapa 2.

4.1.6.4 Arranjo Schlumberger

Nota-se pela Figura 4.26 que no azimuth 165° , posição adjacente ao azimuth 180° , ocorre um decréscimo acentuado na resistividade aparente, semelhante as que

ocorreram na etapa 1. Apesar de uma pequena rotação do menor valor de resistividade do azimute $0^\circ/180^\circ$, o comportamento se aproxima do esperado.

Assim como na etapa 1 esse arranjo apresenta os menores valores de resistividade entre todos os outros arranjos, mostrando que essa configuração de eletrodos é a menos sensível à detecção da resistividade. Vale ainda ressaltar que a variação entre a resistividade máxima e a mínima é pequena, o que indica que detecção da anisotropia também é baixa.

Figura 4.26: Curva resistividade aparente versus azimute para o arranjo Schlumberger, etapa 2.

A elipse da Figura 4.27 - A também mostra esse fenômeno, pois sua forma se aproxima a de um círculo. Porém, a elipse plotada em escala de maior detalhe (Figura 4.27 - B) mostra algumas pequenas variações nos valores de resistividade aparente, indicando que a anisotropia elétrica é detectada, mesmo que de maneira pouco expressiva. A profundidade média de alcance nesse caso é da ordem de 3,4 cm, o que explica o padrão quase circular obtido, pois a medição ficou sobre influência da resistividade aparente da areia.

Figura 4.27: Elipses de resistividade aparente para o arranjo Schlumberger. Em A tem-se elipse em escala menor e em B tem-se escala de maior detalhe. Etapa 2.

4.1.7 Etapa 3

Finalizado os ensaios da etapa 2, foi conveniente variar ainda mais a espessura de solo sobre o maciço para entender a interferência do solo na medição de resistividade aparente. Logo, para a etapa 3 foi colocado 8 cm de areia média saturada sobre o modelo. Conservou-se a mesma disposição inicial entre as placas de mármore e a descontinuidade central de 5 mm, preenchida completamente com a mesma areia média saturada.

4.1.7.1 Arranjo Wenner

Nessa etapa os padrões das curvas de resistividade aparente *versus* azimuth começam a mudar. Percebe-se pela Figura 4.28, que para os quatros espaçamentos no arranjo Wenner, os valores de resistividade aparente ficaram próximos, em uma pequena faixa de variação; entre 640 ohm.m e 570 ohm.m.

Analisando cada espaçamento separadamente, nota-se que a resistividade aparente máxima para eletrodos distanciados de 4 cm foi de 643,79 ohm.m no azimuth 105° e o valor mínimo foi de 593,21 ohm.m no azimuth 15°. Para o espaçamento de 6 cm o valor máximo foi de 639,88 ohm.m no azimuth 150° e o mínimo foi de 600,97 ohm.m no azimuth 30°.

Já para a distância de 8 cm o maior valor encontrado foi de 609,47 ohm.m e o menor foi de 564,92 ohm.m, nos azimutes 90° e 150°, respectivamente. Por fim, a resistividade máxima registrada para o espaçamento de 10 cm foi de 634,54 ohm.m no azimuth 60° e a mínima foi de 586,53 no azimuth 120° (Anexo XV e XVI).

Figura 4.28: Curvas de resistividade aparente *versus* azimutes para o arranjo Wenner, usando quatro espaçamentos de 4, 6, 8 e 10 cm, etapa 3.

Nota-se que para os espaçamentos de 8 e 10 centímetros os valores de resistividade aparente decaem em relação aos espaçamentos de 4 e 6 centímetros (Figura 4.28). Esse fato provavelmente ocorreu devido à interferência de heterogeneidade lateral, visto que com esses espaçamentos é possível ocorrer maior interferência lateral da espessura de areia saturada usada nessa etapa.

Além disso, os valores da resistividade aparente, para todos os arranjos admitiram valores menores que os obtidos nas etapas anteriores, indicando que a presença de solo interfere no valor da resistividade aparente, pois atinge menores porções de rocha em profundidade, conforme Tabela 4.1.

As elipses de resistividade aparente da Figura 4.29 mostram o mesmo padrão para todos os espaçamentos usados na pesquisa. Esse fato atesta, que apesar das resistividades aparentes nos espaçamentos 8 e 10 centímetros serem menores que nos outros dois, esses valores não variam muito (Anexos XV e XVI), de forma que as elipses, na escala

de menor detalhe, apresentam o mesmo aspecto, com um padrão quase circular, que indica que a resistividade aparente registrada sofre grande influência da resistividade aparente da cobertura de areia saturada.

Figura 4.29: Elipses de resistividade aparente para os quatro espaçamentos usados no arranjo Wenner, etapa 3. Escala de pequeno detalhe. Etapa 3.

Já as elipses na escala de maior detalhe mostram que, mesmo que pequena, existe sim a anisotropia elétrica, pois os contornos das elipses são irregulares (Figura 4.30). Nas elipses da Figura 4.30 - B, no azimuth de 150°, aparece uma elevação da resistividade, que pode estar relacionado a uma medida incoerente ou concentração anormal de água ou ar no solo.

Figura 4.30: Em A, elipse de resistividade aparente para o espaçamento de 4 cm. Em B e C, elipses de resistividade para os espaçamentos de 6 e 8 cm, nessa ordem. Em D, elipses para o espaçamento de 10 cm. Escala de maior detalhe. Etapa 3.

4.1.7.2 Arranjo Quadrático

Para essa etapa o arranjo Quadrático se comporta de maneira similar aos outros arranjos. Com o aumento do espaçamento dos eletrodos ocorre o aumento dos valores de resistividade aparente, indicando que o levantamento está atingindo partes mais profundas do modelo, pois atinge valores maiores, mostrando a interferência da resistividade do maciço.

Vale observar que ocorre um comportamento não esperado para o espaçamento de 8 cm (Figura 4.31). Os valores de resistividade aparente estão maiores que no espaçamento de 10 cm. Esse fato pode ser explicado por algumas variáveis, como mau contato dos eletrodos no momento de medição ou concentrações anormais de água ou ar no solo, ocasionando uma anomalia.

Figura 4.31: Curvas de resistividade aparente *versus* azimutes para o arranjo Quadrático, usando quatro espaçamentos distintos, etapa 3.

Pelas elipses de resistividade aparente na escala de menor detalhe da Figura 4.32, nota-se que o eixo maior das elipses estão na direção $0^\circ/180^\circ$. As elipses na escala de maior detalhe apontam o mesmo fato (Figura 4.33). Não se sabe ao certo o motivo para a inversão das elipses, podendo ser devido a maior espessura da areia acima do modelo associado a geometria do arranjo utilizado, pois esse comportamento só ocorreu no arranjo Quadrático. Porém como se trata de um arranjo não colinear, não se pode afirmar que ocorre o paradoxo de anisotropia.

Figura 4.32: Em A, elipse para o espaçamento de 4 cm, em B para espaçamento de 6 cm. Já em C e D, espaçamentos de 8 cm e 10 cm, respectivamente. Levantamento da etapa 3 usando o arranjo Quadrático. Escala de menor detalhe.

Figura 4.33: Em A, elipse para o espaçamento de 4 cm, em B para espaçamento de 6 cm. Já em C e D, espaçamentos de 8 cm e 10 cm, respectivamente. Escala de maior detalhe.

4.1.7.3 Arranjo Dipolo-dipolo equatorial

Para essa etapa, o arranjo Dipolo-dipolo Equatorial se comporta de forma similar em relação às outras etapas. Nos espaçamentos de 2 e 3 centímetros, as curvas da Figura 4.34 possuem aparência semelhantes, porém é notável que no espaçamento de 3 centímetros ocorre um valor de resistividade aparente elevado (1725,95 ohm.m) no azimute de $0^\circ/180^\circ$, fato que não ocorre no espaçamento de 2. Além disso, resistividades de valores elevados ocorrem próximos ao azimute de 45° (Anexo XIX e XX), tanto no espaçamento de 2 e 3 centímetros. De acordo com as curvas da Figura 4.34, para os espaçamentos de 2 e 3 centímetros os valores das resistividades aparentes são praticamente os mesmos.

Para o espaçamento de 4 centímetros, os valores de resistividade são menores que nos outros espaçamentos e o traçado da curva é mais homogêneo. Assim como no arranjo Wenner, esse fato ocorre provavelmente devido às interferências de heterogeneidades

laterais, provocadas possivelmente pela maior espessura de areia sobre o maciço nessa etapa.

Figura 4.34: Curvas de resistividade aparente *versus* azimutes para o arranjo DDE, etapa 3.

No espaçamento de 4 cm o valor máximo de resistividade aparente foi de 1064,65 ohm.m no azimute de 120° e o mínimo é de 812,98 ohm.m no azimute 135°. Como são azimutes próximos um do outro (se defasam somente de 15°), esse fato sugere uma anomalia. (Figura 4.35 - A e 4.36 - A).

Figura 4.35: Elipses de resistividade aparente para o DDE, etapa 3. Escala de menor detalhe. Etapa 3.

Pela elipses da Figura 4.35, para os espaçamentos de 2 e 3 centímetros, nota-se que o eixo menor está no azimute de 90°/270° ou próximo a ele e, conseqüentemente, o maior está ocupando o azimute 0°/180° (Figura 4.35 - B e Figura 4.36 - B). Porém, como se

trata de um arranjo não colinear, não se pode afirmar que o paradoxo de anisotropia ocorre nesse caso (Figura 4.36 - C).

Figura 4.36: Elipses de resistividade aparente para o DDE, etapa 3. Escala de maior detalhe. Etapa 3.

Esse levantamento deixa claro que mesmo existindo uma profundidade média de investigação que o arranjo DDE pode alcançar, as medidas de eletrorresistividade ainda sofrem grande interferência da areia saturada. No espaçamento de 4 cm, essa interferência é menor, visto que as discontinuidades são detectadas (Figura 4.36 - C).

4.1.7.4 Arranjo Schlumberger

O arranjo Schlumberger apresenta valores de resistividade aparente muito próximos dos da etapa anterior, porém ligeiramente menores. Esse fato é esperado, visto que a espessura de areia aumentou, influenciando nos resultados. Nota-se pequena variação de resistividade aparente entre os azimutes, entre 430 ohm.m e aproximadamente 475 ohm.m (Figura 4.37).

Figura 4.37: Curva de resistividade aparente versus azimuth. Arranjo Schlumberger, etapa 3.

Apesar do valor mínimo (429,69 ohm.m) se encontrar no azimuth de $90^{\circ}/270^{\circ}$ e o máximo próximo ao $0^{\circ}/180^{\circ}$, não convém, nesse caso, afirmar que ocorre o paradoxo da anisotropia, pois a variação de valores de resistividade é muito pequena (Figura 4.38). Esse fato é corroborado pela elipses de resistividade aparente da Figura 4.38 - A, que mostram um padrão quase circular para esse arranjo.

Figura 4.38: Elipses de resistividade aparente para o arranjo Schlumberger, etapa 3.

4.1.8 Etapa 4

Nessa etapa distribuíu-se por todo o maciço 19 descontinuidades, formadas pelo encontro de duas placas de mármore, com abertura de 5 mm, preenchidas com areia média, direcionadas verticalmente no azimuth 0° . Sobre o maciço, foram colocados 5

centímetros de areia média bem graduada e saturada. O principal objetivo dessa etapa foi analisar a influência de descontinuidades mais abertas na resposta elétrica.

4.1.8.1 Arranjo Wenner

Assim como em todas os outros levantamentos azimutais deste estudo, nota-se que quando se aumenta o espaçamento dos eletrodos, os valores da resistividade aparente também aumentam, alcançando maiores profundidades investigação (Figura 4.39). Além disso, as curvas da Figura 4.39 mostram poucas variações nos valores de resistividade, indicando que a simulação do maciço criada na etapa 4 se aproxima de uma condição isotrópica ou pouca anisotrópica.

Figura 4.39: Resistividade aparente *versus* azimutes para o arranjo Wenner, usando quatro espaçamentos de 4, 6, 8 e 10 cm, etapa 4.

As elipses da Figura 4.40 apresentam uma anisotropia pouco expressiva, pois apresentam um padrão quase circular e similar para os quatro espaçamentos, aumentando somente o tamanho da elipse, o que indica que se aumentou a profundidade de investigação.

Figura 4.40: Em A, elipse de resistividade aparente para o arranjo Wenner e espaçamento de 4cm. Em B e C, elipses para o espaçamento de 6 e 8 cm. Por fim, em D elipses para o espaçamento de 10 cm. Escala de pequeno detalhe.

Na escala de maior detalhe (Figura 4.41) é possível observar que, mesmo que pequena, a variação de resistividade aparente ocorre nos quatro espaçamentos estudados, indicando que o arranjo é sensível à anisotropia elétrica. Nos espaçamentos de 6, 8 e 10 centímetros claramente não ocorre o paradoxo de anisotropia, pois o eixo maior não é coincidente com a direção das discontinuidades. Já no espaçamento de 4 centímetros, nota-se um valor acentuado próximo a direção das discontinuidades, o que poderia configurar o paradoxo de anisotropia. Porém, quando se observa os valores de todos os azimutes nota-se que a variação entre eles é pequena (Figura 4.40 e 4.41), concluindo a não ocorrência do paradoxo de anisotropia.

Figura 4.41: Escala de maior detalhe para as elipses de resistividade aparente para o arranjo Wenner e espaçamentos de 4, 6, 8 e 10 centímetros, respectivamente. Etapa 4.

4.1.8.2 Arranjo Quadrático

Nessa etapa, no espaçamento de 4 cm os valores máximos estão próximos do azimute 105° e os mínimos, do azimute de 15° , considerando esses azimutes como as regiões do eixo maior e menor, respectivamente. Para o espaçamento de 6 cm a resistividade máxima e a mínima estão concentradas nos mesmos azimutes que no espaçamento 4. No caso do espaçamento de 8 cm o máximo valor de resistividade aparente está posicionado no azimute de 45° e o mínimo no de 150° . Já no de 10 cm o máximo se encontra no azimute de 165° e o mínimo no azimute de 75° (Figura 4.42).

As elipses de resistividade aparente da Figura 4.43 mostram que o eixo maior não é coincidente com a direção das discontinuidades, estando esse próximo ao azimute 90° . Porém, além de se tratar de um arranjo não linear, a variação de valores de resistividade aparente é pequena, logo, não se considera a ocorrência do paradoxo de anisotropia.

Figura 4.42: Curvas de resistividade aparente *versus* azimutes para o arranjo Quadrático. Dados da etapa 4. Espaçamentos de 4, 6, 8 e 10 cm.

Figura 4.43: Elipses de resistividade aparente, escala de pequeno detalhe, para o arranjo Quadrático. Em A, elipses para o espaçamento de 4 cm, seguida de B para espaçamento de 6 cm. Em C e D, espaçamentos de 8 cm e 10 cm, respectivamente.

O fato supracitado fica ainda mais evidente pelas elipses da Figura 4.44. Pode-se observar que nas elipses A e B, os valores máximos de resistividade aparente estão

próximo do azimute $90^\circ/270^\circ$, que é perpendicular a direção das discontinuidades. Porém, nas elipses C e D, o eixo maior está mais próximo do $0/180^\circ$. Além disso, nessas elipses pode-se notar que a anisotropia elétrica é detectada por esse arranjo, devido às variações dos valores de resistividade, notados pelas irregularidades nas elipses.

Figura 4.44: Elipses de resistividade aparente, escala de maior detalhe, para o arranjo Quadrático. Em A e B, elipses para o espaçamento de 4 cm e 6 cm. Em C e D, espaçamentos de 8 cm e 10 cm, respectivamente.

4.1.8.3 Arranjo Dipolo-dipolo equatorial

Usando o arranjo Dipolo-dipolo equatorial, nota-se que em relação aos outros arranjos, este apresenta os maiores valores de resistividade aparente, atestando que é o arranjo mais sensível à detecção de resistividade aparente. Pode-se observar pela Figura 4.45 que a variação de resistividade aparente nesse arranjo é de certa forma elevada, o que mostra que o DDE detecta melhor as variações desse parâmetro em relação aos outros arranjos.

Figura 4.45: Curvas de resistividade aparente *versus* azimutes para o arranjo DDE. Três espaçamentos distintos. Dados da etapa 4.

Nota-se pelas elipses de resistividade aparente da Figura 4.46, que o eixo maior da elipses para o espaçamento de 2 cm não está na direção de 90°/270°, sofrendo um deslocamento de aproximadamente 30°, o que gera uma inconsistência, podendo ser considerado como uma anomalia.

Figura 4.46: Elipses de resistividade aparente para o arranjo DDE. Escala de pequeno detalhe.

Já nas elipses das Figuras 4.46 B e C, o eixo maior está localizado próximo ao azimute de 90°/270°, perpendicular à direção das discontinuidades, ou seja, é a região de maior resistividade e portanto a de menor condutividade elétrica. Já o eixo menor está localizado próximo ao azimute 0°/180°, coincidente com a direção das discontinuidades.

Nas elipses da Figura 4.47 (escala de maior detalhe), fica evidente as direções dos eixos maior e menor, além das irregulares nas elipses, que indica que os valores de resistividade não são iguais, fato que atesta a anisotropia elétrica.

Figura 4.47: Elipses de resistividade aparente para o arranjo DDE. Escala de maior detalhe.

4.1.8.4 Arranjo Schlumberger

Pela curva da Figura 4.48 é possível observar que o valor máximo de resistividade aparente está posicionado no azimuth 90°/270° e o mínimo está no azimuth 0°/180°, atestando a sensibilidade do arranjo à anisotropia elétrica (Anexo XXVIII). Notar que os valores de resistividade são baixos, o que mostra a influência da areia saturada nas medições.

Figura 4.48: Curva de resistividade aparente *versus* azimuth para o arranjo Schlumberger, etapa 4.

Pelas elipses de resistividade aparente da Figura 4.49 - A e B, nota-se que o eixo maior fica posicionado no azimuth $90^\circ/270^\circ$ e o eixo menor está no azimuth $0^\circ/180^\circ$, coincidente com a direção das discontinuidades, não ocorrendo, portanto, o paradoxo da anisotropia. A ellipse da Figura 4.49 - B (escala de maior detalhe) mostra a variação nos valores de resistividade aparente, mesmo que pequena, indicando que esse arranjo é capaz de detectar a anisotropia elétrica.

Figura 4.49: Elipses de resistividade aparente para o arranjo Schlumberger, etapa 4.

4.1.9 Deslocamento das elipses

Esperava-se que o eixo menor todas as elipses estivesse no azimuth $0^\circ/180^\circ$, porém é comum algumas delas se encontrarem deslocadas de alguns graus em relação ao azimuth $0^\circ/180^\circ$, podendo ser no sentido horário ou anti-horário. A Tabela 4.2, mostra esses deslocamentos em relação ao azimuth 0° , considerando a menor rotação.

Tabela 4.2: Deslocamento do eixo nas elipses para as quatro etapas estudadas.

ETAPA 1					
Arranjo	Espaçamento (cm)	Resistividade Máxima (ohm.m)	Resistividade mínima (ohm.m)	Deslocamento 0°	Sentido
Wenner	0,04	860,485	608,637	0°	-
	0,06	1218,957	910,104	0°	-
	0,08	1489,756	1146,232	0°	-
	0,1	1808,700	1382,537	0°	-
Quadrático	0,04	670,688	503,465	30°	horário
	0,06	903,020	678,801	45°	horário
	0,08	1055,739	830,311	0°	-
	0,1	1320,845	956,181	30°	anti-horário
Dipolo-Dipolo Equatorial	0,02	3270,228	1691,259	0°	-
	0,03	3523,611	2346,300	30°	anti-horário
	0,04	3370,536	1552,268	60°	horário
Schlumberger	0,04	876,978	728,771	15°	horário
ETAPA 2					
Arranjo	Espaçamento (cm)	Resistividade Máxima (ohm.m)	Resistividade mínima (ohm.m)	Distorção 0°	Sentido
Wenner	0,04	348,247	306,711	15°	anti-horário
	0,06	429,857	348,491	30°	anti-horário
	0,08	509,028	456,187	0°	-
	0,1	598,224	547,674	0°	-
Quadrático	0,04	417,293	191,333	120°	horário
	0,06	445,631	337,849	75°	horário
	0,08	473,440	423,029	75°	horário
	0,1	547,800	488,406	60°	horário
Dipolo-Dipolo Equatorial	0,02	1522,610	580,360	45°	horário
	0,03	2639,194	1637,652	30°	horário
	0,04	2459,234	1860,341	15°	anti-horário
Schlumberger	0,04	484,038	419,700	15°	anti-horário
ETAPA 3					
Arranjo	Espaçamento (cm)	Resistividade Máxima (ohm.m)	Resistividade mínima (ohm.m)	Distorção 0°	Sentido
Wenner	0,04	643,794	593,213	15°	horário
	0,06	639,885	600,972	0°	-
	0,08	609,469	564,926	30°	anti-horário
	0,1	634,542	586,528	60°	anti-horário
Quadrático	0,04	455,298	318,943	75°	horário
	0,06	562,956	454,492	60°	horário
	0,08	849,400	602,841	75°	horário
	0,1	602,178	501,266	90°	horário
Dipolo-Dipolo Equatorial	0,02	1542,108	858,555	90°	horário
	0,03	1725,954	856,561	90°	horário
	0,04	1064,656	872,715	15°	horário
Schlumberger	0,04	474,903	429,689	90°	horário
ETAPA 4					
Arranjo	Espaçamento (cm)	Resistividade Máxima (ohm.m)	Resistividade mínima (ohm.m)	Distorção 0°	Sentido
Wenner	0,04	230,407	212,723	45°	horário
	0,06	301,921	279,136	0°	-
	0,08	367,961	336,106	0°	-
	0,1	413,729	371,296	0°	-
Quadrático	0,04	242,190	178,158	30°	horário
	0,06	281,725	230,330	15°	horário
	0,08	331,177	284,931	30°	anti-horário
	0,1	360,903	293,143	60°	horário
Dipolo-Dipolo Equatorial	0,02	900,870	565,146	30°	anti-horário
	0,03	1134,257	630,461	45°	horário
	0,04	2449,919	1063,780	30°	anti-horário
Schlumberger	0,04	379,222	273,294	0°	-

O arranjo Wenner foi o que sofreu os menores deslocamentos, variando entre 15° e 60°, seguido do arranjo Schlumberger, também apresentando pequenos deslocamentos. O arranjo com os maiores deslocamentos foi o Quadrático e os intermediários ocorreram no Dipolo-dipolo Equatorial. Analisando-se todas as etapas, nota-se que a 3 sofreu maiores deslocamentos, o que pode ser atribuído a maior espessura de cobertura de solo na mesma.

4.1.10 Coeficiente de anisotropia e resistividade aparente média

Como já ressaltado anteriormente, o coeficiente de anisotropia (λ) é calculado através da raiz quadrada da razão da resistividade aparente na direção transversal, que corresponde a resistividade no eixo maior, com a resistividade aparente na direção longitudinal, sendo esta igual a resistividade no eixo menor (Taylor e Fleming, 1988; Watson e Barker, 1999; Asare *et al.*, 2015).

Quando $\lambda=1$ o meio é considerado isotrópico. Caso λ esteja entre 1 e 2, ocorre a anisotropia elétrica. Quanto maior o valor de λ mais anisotrópico é considerado o meio. Logo, observa-se pela Tabela 4.3 que todos os arranjos, com os respectivos espaçamentos de eletrodos usados, atestam valores de λ maiores que 1, o que indica anisotropia elétrica detectada em todos os casos.

Para o arranjo Wenner e Quadrático os valores de λ estão muito semelhantes, assim como no arranjo Schlumberger, sendo um pouco maiores que 1. Já no arranjo Dipolo-dipolo equatorial os valores para λ são maiores que nos outros arranjos, variando de 1,56 a 1,10 (Tabela 4.3). Esse fato indica que o arranjo DDE é mais sensível detecção da anisotropia elétrica que os outros arranjos.

Tabela 4.3: Coeficientes de anisotropia para todos os arranjo e etapas.

ARRANJO	ESPAÇAMENTO (m)	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4
Wenner	0,04	1,19	1,05	1,04	1,04
	0,06	1,16	1,08	1,01	1,04
	0,08	1,14	1,06	1,02	1,04
	0,1	1,14	1,04	1,03	1,05
Quadrático	0,04	1,12	1,25	1,19	1,15
	0,06	1,14	1,15	1,10	1,09
	0,08	1,13	1,05	1,19	1,07
	0,1	1,08	1,05	1,11	1,09
DDE	0,02	1,36	1,56	1,20	1,26
	0,03	1,19	1,13	1,42	1,26
	0,04	1,33	1,14	1,10	1,43
Schlumberger	0,04	1,10	1,07	1,04	1,18

Para o arranjo Wenner, os maiores valores de λ foram encontrados na etapa 1, com valores muito próximos uns dos outros. Para o Quadrático, apesar de ocorrer um $\lambda=1,25$ na etapa 2, de maneira geral, os maiores valores para esse arranjo também ocorrem na etapa 1. No arranjo Schlumberger, os maiores valores de λ ocorreram na etapa 1 e 4, sendo praticamente iguais (1,1- etapa 1 e 1,18 etapa 4). No DDE, nota-se que todos os valores de λ foram altos, porém, em geral, valores máximos estão presentes na etapa 1 e na etapa 4.

Com exceção do Quadrático, que indicou várias direções de anisotropia, não condizente com a anisotropia real do maciço, os arranjos foram satisfatórios na detecção da anisotropia elétrica, merecendo destaque os arranjos Dipolo-dipolo equatorial e Wenner, que apresentaram os maiores valores de coeficiente de anisotropia e resultados mais consistentes, respectivamente.

As resistividades elétricas transversais e longitudinais dos maciços rochosos foram calculadas de acordo com as equações 2.11 e 2.12, respectivamente (Boris, 2005), tomando-se os valores de resistência da rocha e das discontinuidades preenchidas com areia saturada (Tabela 4.4). Nota-se que para o maciço com a discontinuidade central de 5 mm (etapas 1, 2 e 3), o valor da anisotropia elétrica do maciço fraturado se aproxima dos determinados pelos levantamentos (Tabela 4.3), calculados segundo os conceitos de Taylor e Fleming (1988) e Watson e Barker (1999). Porém, para o maciço com todas as

descontinuidades com 5 mm de abertura (etapa 4), o valor foi maior que o encontrado nos ensaios.

Tabela 4.4: Anisotropia calculada para o maciço rochoso (Boris, 2005).

Anisotropia para uma descontinuidade central de 5 mm
1,27
Anisotropia para várias descontinuidade central de 5 mm
1,97

A resistividade aparente média, como já definida anteriormente, é dada pela raiz quadrada do produto da resistividade do eixo maior com o eixo menor (Watson e Barker, 1999). Os valores das resistividade média para esse estudo são apresentados na Tabela 4.5. Nela se observa que os maiores valores ocorrem na etapa 1, visto que essa sofre pouca influência da resistividade da areia média saturada (pequena espessura), detectando valores de resistividade maiores, pois sofrem maior influência da resistividade da rocha. Os menores valores ficam com a etapa 4, visto que o modelo é mais fraturado e contém maior quantidade de areia que os outros. Dentre os arranjos, o que apresenta os maiores valores de resistividade aparente foi o DDE, seguido do Wenner, Quadrático e por fim, Schlumberger

Tabela 4.5: Resistividades aparente médias para todas as etapas estudadas.

	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4
Arranjo	Resistividade média (ohm.m)	Resistividade média (ohm.m)	Resistividade média (ohm.m)	Resistividade média (ohm.m)
Wenner	723,687	333,0809	617,986	221,792
	1053,270	375,8695	630,534	290,405
	1306,754	476,6984	578,225	351,658
	1581,327	569,1988	618,245	388,960
Quadrático	588,866	333,7178	380,432	204,176
	788,994	388,0154	498,550	257,180
	936,265	444,9070	715,578	309,329
	989,765	514,3615	543,753	329,869
DDE	2399,786	905,8494	1282,213	713,529
	2970,588	1990,4922	1215,888	839,332
	2059,646	2120,0989	891,084	1712,337
Schlumberger	799,447	447,2623	444,957	321,930

4.1.11 Discussão dos resultados

Em todas as etapas, tanto pelos gráficos cartesianos quanto pelas elipses de resistividade aparente, notou-se que os arranjos Wenner e Schlumberger trouxeram as respostas mais consistentes com o esperado, com poucas anomalias, e alcançaram porções consideráveis do maciço rochoso em profundidade, com boas respostas da anisotropia elétrica. Observou-se, de modo geral, que a determinação da resistividade com eletrodos polarizáveis é aceitável, já que os valores das medidas mostraram boa acurácia e precisão.

Para o arranjo Wenner, principalmente nas etapas 2 e 3, observa-se que ocorreram alguns deslocamentos dos eixos das elipses em relação ao azimute 0° (Tabela 4.2). Esse fato provavelmente ocorreu devido a maior espessura da cobertura de areia no maciço. Uma contra prova pode ser observada na etapa 1, onde não ocorreu nenhum deslocamento das elipses e a cobertura era menor (1,8 cm). Na etapa 4, os valores de resistividade em cada azimute sofreram pequenas variações, o que mostra que esta configuração de maciço, com muitas descontinuidades abertas, pode tê-lo tornado menos anisotrópico.

Para o arranjo Quadrático, nota-se que a situação da etapa 1 trouxe os melhores resultados, com as elipses pouco deslocadas, quase todas com o eixo maior posicionado no azimute $90^\circ/270^\circ$. Porém, nas outras etapas as elipses de resistividade aparente não obedeceram um padrão, ficando deslocadas de vários graus em relação ao azimute 0° , sugerindo ser essa configuração de eletrodos não muito confiável (Tabela 4.2). Apesar disso, os valores de resistividade aparente medidos são relativamente elevados, o que indica que a corrente injetada com esse arranjo atingiu maiores profundidades, alcançando o maciço rochoso.

O arranjo DDE foi o que trouxe os maiores valores de resistividade aparente entre todos os arranjos estudados, o que indica que o arranjo é capaz de detectar o maciço rochoso com maior sensibilidade que os outros. Porém, muitas elipses mostraram valores anormais e fora do padrão em alguns azimutes, indicando muitas anomalias (Figuras 4.24 e 4.25). Por fim, o arranjo Schlumberger, em todas as etapas, trouxe resultados muito semelhantes ao Wenner, porém os valores de resistividade aparente foram

menores, indicando um arranjo menos sensível à detecção desse parâmetro. Os deslocamentos das elipses foram mínimos (15°), além de sempre atingir partes do maciço.

Notou-se em todas as etapas realizadas que o aumento da espessura do solo gerou valores de resistividades combinados da areia e do maciço, gerando valores intermediários de resistividade desses materiais. Ainda é importante observar que em espaçamentos maiores, como no Wenner de 8 e 10 cm, na etapa 3, os valores de resistividade aparente diminuíram em relação aos espaçamentos menores (4 e 6 cm), indicando a influência da maior espessura e quantidade de areia nas laterais do tanque utilizada nas etapas.

As profundidades de investigação preconizadas na literatura, em todos os arranjos e etapas, foram coerentes com as respostas encontradas nos modelos físicos. Não foi observado o fenômeno do paradoxo de anisotropia em levantamentos elétricos colineares. O motivo para este comportamento pode ser a elevada espessura de cobertura de solo em relação às distâncias entre os eletrodos utilizadas nas etapas (Watson e Barker, 2010). Vale observar que os resultados em todas as etapas consistiram numa combinação da resistividade da areia saturada com a do maciço rochoso.

Na etapa 1, para todos os arranjos, os coeficiente de anisotropia gerados pelos valores do eixo maior com o eixo menor foram semelhantes aos obtidos pela teoria de Boris (2005) para o maciço com uma fratura central de 5mm. Nas etapas 2 e 3, os coeficientes de anisotropia tendem a diminuir um pouco para os arranjos Wenner e Schlumberger e se mantêm para o Quadrático e DDE. Na etapa 4, que se diferencia da 2 pela maior abertura de todas as fraturas, os valores dos coeficientes tendem a diminuir, indicando que este fator não é favorável a detecção de anisotropias para as condições adotadas.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Conclusões

Após examinar e tratar todos os dados levantados, é possível observar que todos os arranjos usados nas pesquisas são capazes de detectar a anisotropia elétrica. O levantamento com o arranjo Dipolo-dipolo, o mais empregado para caminhamentos elétricos, permitiu a detecção da orientação das descontinuidades, embora se tenha observado anomalias elétricas que dificultaram esta visualização. Estas anomalias podem ser creditadas a sutis variações na resistividade da cobertura de areia ou a erros nas medições.

Os arranjos que apresentaram melhores resultados em prever a direção da família de descontinuidades foram os colineares, como Wenner e Schlumberger. O arranjo DDE também apresentou razoáveis resultados, tendo sido o que revelou maiores coeficientes de anisotropia. Porém, anomalias são mais comuns nesse arranjo, causando desvios no padrão de elipses, como, por exemplo, na etapa 1 para o espaçamento entre os eletrodos de 4 cm. Além disso, este método nem sempre apresentou boa coincidência entre o mínimo resistivo e a orientação das descontinuidades.

O arranjo Quadrático mostrou valores dos coeficientes de anisotropia elétrica menores que do DDE, mas também elevados, e resistividades aparentes semelhantes as encontradas no arranjo Wenner. Foi também o arranjo com maiores profundidades médias de alcance nas investigações. Porém as orientações dos mínimos resistivos foi muito aleatória em relação às descontinuidades, não se mostrando confiável para sua detecção, trazendo questionamentos sobre sua eficiência.

De maneira geral, a espessura de solo acima do maciço influenciou nas resistividades aparentes em todas as etapas, indicando valores menores onde sua espessura era maior, resultantes da combinação rocha + areia média saturada (Orellana, 1972). Os levantamentos da etapa 4 mostraram que embora os valores de resistividade são

inferiores aos da etapa 2, a maior abertura das descontinuidades resultou num pequeno incremento da anisotropia elétrica.

Diante dos fatos apresentados, constata-se que o arranjo Wenner, apesar de apresentar valores de resistividade média e coeficiente de anisotropia menores que o DDE, é o que apresenta menos anomalias, além de ser de simples execução e aquisição de dados. Além disso, alcançou consideráveis profundidades de investigação e também apresentou valores de coeficiente de anisotropia relativamente elevados.

Os levantamentos azimutais são muito mais rápidos que os caminhamentos elétricos e mostraram bom potencial para detecção de descontinuidades verticais, podendo ser úteis para levantamentos expeditos e repetidos em problemas associados à geotecnia, como o da percolação preferencial em maciços rochosos, detecção e evolução de *piping*, entre outros. Quando se comparam nos experimentos os levantamentos azimutais com o resultado do levantamento do caminhamento elétrico, como o arranjo dipolo-dipolo, verifica-se que os azimutais colineares mostraram de forma mais clara a orientação das descontinuidades.

Para o caso dos levantamentos com equipamentos de corrente contínua, a literatura preconiza o emprego de eletrodos não polarizáveis. A boa qualidade e a repetitividade (precisão) dos resultados, mesmo para os arranjos com respostas menos coerentes com o modelo, como o Quadrático, indicam que eletrodos polarizáveis podem ser empregados, devido ao seu menor custo e facilidade de operação em campo.

Todo procedimento experimental deve ser verificado em campo, por mais confiáveis que sejam os resultados dos ensaios obtidos no laboratório. As condições não controladas em campo podem trazer resultados distintos em relação as do laboratório.

É bom lembrar que toda investigação geológico-geotécnica isolada não oferece um resultado preciso das condições reais em subsuperfície. É necessário combinar várias formas de investigações, tais como sondagens de qualquer natureza (obedecendo a aplicabilidade da mesma), instrumentações, outros métodos geofísicos, para assim alcançar um panorama mais preciso e confiável. Sendo assim, os métodos desse estudo

podem complementar outros métodos em uma campanha de investigação geológico-geotécnica para qualquer finalidade.

5.2 Sugestões:

Como se trata de um trabalho experimental, sugere-se aprimorar alguns aspectos, caso sejam realizadas pesquisas futuras na mesma linha de atuação. Segue abaixo algumas sugestões:

- A) Utilizar um sistema de multicanal de eletrodos com comutação automática, que permite montar um conjunto de eletrodos igualmente espaçados entre si. Sendo assim, as medidas de resistividade aparente podem ser realizadas automática e simultaneamente, sem a intervenção do operador. Esse procedimento permite coletar dados de resistividade em tempo reduzido e ainda pode evitar erros de medição, aumentando a acurácia dos dados;
- B) Sugere-se compactar o material empregado na lateral do tanque, pois assim evita-se a formação de bolhas de ar, que pode gerar em alguns pontos, saturação diferente e influenciar no resultado final;
- C) Simular no maciço mais famílias de descontinuidades, com outras direções e mergulhos, além de variar as espessuras de solo acima do maciço, sob condições saturadas ou não;
- D) Realizar modelagem direta com softwares apropriados para balizar os resultados encontrados com os obtidos nas etapas da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASARE, V. S.; GYASI, E.; OKYERE, B. F. (2015). *Azimuthal Resistivity Souding with the Symmetric Schlumberger and the Alpha Wenner Arrays to study subsurface electrical anisotropy variation with depth*. International Journal of Scientific and Research Publications, v. 5, Issue 5. 11 p .

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1995). *Rochas e Solos*: NBR 6502. Rio de Janeiro, 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). *Análise granulométrica*: NBR 7181. Rio de Janeiro, 13 p.

AZEVEDO, F. S. (2005). Estudo experimental da influência de tensões na permeabilidade de rochas produtoras de petróleo. Rio de Janeiro - RJ. Dissertação de Mestrado. PUC RIO, Departamento de Engenharia Civil. 134 p.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mech. v.6, n.4. 8-21 p.

BENARD, J. (2003). *Short Note on the Depth of Investigation of Electrical Methods*. IRIS Instruments, Orleans, France. (<http://www.iris-instruments.com>). Acessado em 25/11/2015.

BIENIAWSKI, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classification*. New York.

BORIS, M. (2005). Azimuthal Resistivity to Characterize Fratures in the Battleford Formation at King Site. Dissertação de Mestrado. Universidade de Saskatchewan. Saskatoon. 161 p.

BRAGA, A. C. O. (2007). *Métodos Geoeletricos Aplicados nos Estudos de Captação e Contaminação das Águas Subterrâneas*. Unesp, Rio Claro, São Paulo, 79 p.

CAMPOS, A. F. (2004). Utilização de métodos geoeletricos na caracterização de rochas fraturadas: Estudo de caso nos arenitos do Grupo Itararé - Bacia do Paraná. Curitiba-PR. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 104 p.

CAVALCANTI, M. M. (2013). Aplicação de Métodos Geoeletricos no Delineamento da Pluma de Contaminação nos Limites do Aterro Controlado do Jokey Clube de Brasília. Brasília – DF. Dissertacao de Mestrado. Universidade de Brasília. 128 p.

CUTRIM, A . O. (2011). *Prospecção de Água Subterrânea no Sudoeste do município de Rondonópolis (MT) usando sondagem elétrica vertical*. Revista Brasileira de Geofísica. 29 (4): 745-751 p.

ESSIEN, E. E.; EHIRIM. C. N. (2009). *Comparative Investigation of Offset Wenner, Square and Schlumberger arrays in Electrical Anisotropy Studies*. Scientia Africana. v. 8 nº 2. 53-60 p.

FACHIN, S. J. S. (2012). O Sinal de Potencial Espontâneo em Investigações Ambientais: Fatores que Condicionam a Amplitude de uma Anomalia. São Paulo. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 165 p.

FERNANDES, C. E. M. (1984). *Fundamentos da Prospecção Geofísica*. 1ª Edição. Editora Interciência. Rio de Janeiro. 190 p.

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

GOUDSWAARD, W. (1957). *On the effect of the tank wall material in geoelectrical model experiments*. Geophysical Prospecting. v 5, 272–281 p.

HABBERJAM, G. M.; WATKINS, G. E. (1967). *The use of a square configuration in resistivity prospecting*. Geophysical Prospecting. v. 15, 221-235 p.

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. 476-485 p.

LEÃO, M. F. (2014). *Uso da Eletroresistividade na Identificação de Zonas de Instabilidade Originadas por Cavidades Cársticas*. Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas. Conferência Especializada ISRM 09-13. 6 p.

LOKE, M. H. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies - A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. Guia Prático. Málasia. 63 p.

LOPES, M. B. (2015). *Análise da Eficiência do Sistema de Vedação da Fundação em Granito de uma Barragem de Concreto*. Ouro Preto- MG. Dissertação de Mestrado, Núcleo de Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto. 162 p.

LULING, M. G. (2013). *The paradox of anisotropy in electric logging: A simple proof and extensions to other physics domains*. Geophysics. v 28, nº 1. 1-8 p.

MAINALI, G. (2006). *Monitoring of Tailings Dams with Geophysical Methods*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Tecnologia. Departamento de Química. Engenharia e Geociências. Ore Geologia Mineral e Geofísica Aplicada. Sweden. 93 p.

OLIVEIRA, A. M. S. (1981). *Estudo da Percolação de água em maciços Rochosos para o Projeto de Grandes Barragens*. São Paulo. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. 216 p.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (1998). *Geologia de Engenharia*. ABGE. 1ª

edição. Sao Paulo. 586 p.

OLIVEIRA, J. P. L. (2009). Caracterização da pluma de Contaminação numa Antiga Lixeira com o Método de Resistividade Electrica. Lisboa- Portugal. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa. 73 p.

ORELLANA, E. (1972). *Prospeccion geoeletrica en corriente continua*. 1ª edição. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips, Madrid. 523 p.

PERGAVO, E.; MOUSATOV, A.; SHEVNIN, V. (2001). *Joint Influence of Resistivity Anisotropy and Inhomogeneity for a Single Dipping Interface Between Isotropic Overburden and Anisotropic Basement*. Reserch Gate. 1-10 p.

RIOS, J. L. P. (1986). Modelos Matemáticos em Hidráulica e no Meio Ambiente. Simpósio Luso-Brasileiro sobre Simulação e Modelação em Hidráulica. APRH – LNEC. Lisboa, Portugal.

TAYLOR, R. W.; FLEMMING, A. H. (1988), *Characterizing Jointed Systems by Azimuthal Resistivity Surveys*. Ground Water, v.26, nº 4. 464–474 p.

TEIXEIRA, W. L. (2013). Um estudo das condições de percolação e estabilidade em barragens de terra mediante métodos geofísicos: caso do dique de Sant Llorenç de Montgai- Espanha. Natal –RN. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande. 188 p.

TELFORD W. M., GELDART L. P., SHERIFF R. E., KEYS D. A. (1990). *Applied Geophysics*, 2 edição. Cambridge: Cambridge University, 770p.

ZORZI, R. R.; RIGOTI, A. (2011). *Aplicação de método geoeletricos para monitoramento da barragem de concreto da UHE Governador José Richa*. Boletim Paranaense de Geociências, v. 64-65, 48-58 p.

WATSON K. A.; BARKER, R. D. (1999). *Differentiating anisotropy and lateral effects*

using azimuthal resistivity offset Werner soundings. Geophysics, v.64, 739-745 p.

WATSON K. A.; BARKER, R. D. (2010). *Tank modeling of azimuthal resistivity surveys over anisotropic bedrock with dipping overburden.* Near Surface Geophysics, v. 8, 297-309 p.

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. v. 33, 6 p

ANEXOS

ANEXO I: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Wenner para espaçamento de 4 e 6 cm. Etapa1.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP Arranjo Wenner - Fase 1 </div> </div>					
Espacamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute (°)	Fator k	Resistividade aparente (ohm.m)
0,04	0,00244	5,92	0	0,2512	608,6374
	0,00201	5,27	15	0,2512	657,5285
	0,00196	5,81	30	0,2512	742,9379
	0,00198	5,92	45	0,2512	750,6397
	0,00202	6,43	60	0,2512	800,5183
	0,00197	6,50	75	0,2512	828,8325
	0,00201	6,90	90	0,2512	860,4848
	0,00200	6,66	105	0,2512	834,6862
	0,00196	6,38	120	0,2512	819,5026
	0,00207	6,43	135	0,2512	780,2976
	0,00202	6,11	150	0,2512	760,6585
	0,00210	6,00	165	0,2512	716,5769
	0,00244	5,92	180	0,2512	608,6374
	0,00201	5,27	195	0,2512	657,5285
	0,00196	5,81	210	0,2512	742,9379
	0,00198	5,92	225	0,2512	750,6397
	0,00202	6,43	240	0,2512	800,5183
	0,00197	6,50	255	0,2512	828,8325
	0,00201	6,90	270	0,2512	860,4848
	0,00200	6,66	285	0,2512	834,6862
	0,00196	6,38	300	0,2512	819,5026
	0,00207	6,43	315	0,2512	780,2976
	0,00202	6,11	330	0,2512	760,6585
	0,00210	6,00	345	0,2512	716,5769
	0,00244	5,92	360	0,2512	608,6374
espaçamento (m)	corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute (°)	fator k	resistividade aparente (ohm.m)
0,06	0,00148	3,57	0	0,3768	910,1038
	0,00144	3,96	15	0,3768	1038,6042
	0,00143	4,16	30	0,3768	1096,1455
	0,00143	4,12	45	0,3768	1087,2617
	0,00144	4,52	60	0,3768	1185,4775
	0,00143	4,58	75	0,3768	1209,6336
	0,00145	4,68	90	0,3768	1218,9567
	0,00144	4,57	105	0,3768	1192,1848
	0,00144	4,59	120	0,3768	1198,2762
	0,00142	4,33	135	0,3768	1145,4014
	0,00143	4,32	150	0,3768	1135,6577
	0,00140	4,00	165	0,3768	1074,9093
	0,00148	3,57	180	0,3768	910,1038
	0,00144	3,96	195	0,3768	1038,6042
	0,00143	4,16	210	0,3768	1096,1455
	0,00143	4,12	225	0,3768	1087,2617
	0,00144	4,52	240	0,3768	1185,4775
	0,00143	4,58	255	0,3768	1209,6336
	0,00145	4,68	270	0,3768	1218,9567
	0,00144	4,57	285	0,3768	1192,1848
	0,00144	4,59	300	0,3768	1198,2762
	0,00142	4,33	315	0,3768	1145,4014
	0,00143	4,32	330	0,3768	1135,6577
	0,00140	4,00	345	0,3768	1074,9093
	0,00148	3,57	360	0,3768	910,1038
	0,00145	3,42	345	0,628	1486,0737
	0,00179	3,93	360	0,628	1382,5373

ANEXO II: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Wenner para espaçamento de 8 e 10 cm. Etapa 1.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Wenner - Fase 1					
espaçamento (m)	corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute (°)	fator k	resistividade aparente (ohm.m)
0,08	0,00159	3,62	0	0,5024	1146,2319
	0,00147	3,56	15	0,5024	1215,5574
	0,00136	3,43	30	0,5024	1268,3137
	0,00142	3,88	45	0,5024	1377,1671
	0,00143	4,10	60	0,5024	1440,4476
	0,00148	4,35	75	0,5024	1475,5171
	0,00144	4,27	90	0,5024	1489,7556
	0,00144	4,19	105	0,5024	1460,6815
	0,00146	4,28	120	0,5024	1475,0096
	0,00142	3,96	135	0,5024	1399,8798
	0,00142	3,78	150	0,5024	1333,0660
	0,00142	3,51	165	0,5024	1240,6685
	0,00159	3,62	180	0,5024	1146,2319
	0,00147	3,56	195	0,5024	1215,5574
	0,00136	3,43	210	0,5024	1268,3137
	0,00142	3,88	225	0,5024	1377,1671
	0,00143	4,10	240	0,5024	1440,4476
	0,00148	4,35	255	0,5024	1475,5171
	0,00144	4,27	270	0,5024	1489,7556
	0,00144	4,19	285	0,5024	1460,6815
	0,00146	4,28	300	0,5024	1475,0096
	0,00142	3,96	315	0,5024	1399,8798
	0,00142	3,78	330	0,5024	1333,0660
	0,00142	3,51	345	0,5024	1240,6685
	0,00159	3,62	360	0,5024	1146,2319
espaçamento (m)	corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute (°)	fator k	resistividade aparente (ohm.m)
0,1	0,00179	3,93	0	0,628	1382,5373
	0,00138	3,38	15	0,628	1543,3898
	0,00137	3,54	30	0,628	1617,2524
	0,00143	3,84	45	0,628	1686,3776
	0,00139	3,92	60	0,628	1776,8173
	0,00137	3,94	75	0,628	1801,6893
	0,00139	4,00	90	0,628	1808,7002
	0,00142	4,06	105	0,628	1797,0235
	0,00140	3,95	120	0,628	1770,3619
	0,00146	3,96	135	0,628	1705,8032
	0,00144	3,66	150	0,628	1599,8701
	0,00145	3,42	165	0,628	1486,0737
	0,00179	3,93	180	0,628	1382,5373
	0,00138	3,38	195	0,628	1543,3898
	0,00137	3,54	210	0,628	1617,2524
	0,00143	3,84	225	0,628	1686,3776
	0,00139	3,92	240	0,628	1776,8173
	0,00137	3,94	255	0,628	1801,6893
	0,00139	4,00	270	0,628	1808,7002
	0,00142	4,06	285	0,628	1797,0235
	0,00140	3,95	300	0,628	1770,3619
	0,00146	3,96	315	0,628	1705,8032
	0,00144	3,66	330	0,628	1599,8701
	0,00145	3,42	345	0,628	1486,0737
	0,00179	3,93	360	0,628	1382,5373

ANEXO III: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Quadrático para espaçamento de 4 e 6 cm. Etapa 1.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Quadrático - Fase 1					
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K (m)	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,06	0,0028	3,0	0,64300	0	689,3665
	0,0030	3,3	0,64300	15	699,7808
	0,0030	3,3	0,64300	30	702,6196
	0,0032	3,4	0,64300	45	678,8009
	0,0031	3,6	0,64300	60	731,1516
	0,0031	3,8	0,64300	75	768,3346
	0,0029	4,1	0,64300	90	903,0198
	0,0030	3,9	0,64300	105	837,2818
	0,0031	3,9	0,64300	120	820,4078
	0,0031	3,7	0,64300	135	772,0203
	0,0031	3,7	0,64300	150	766,2629
	0,0031	3,8	0,64300	165	773,6672
	0,0028	3,0	0,64300	180	689,3665
	0,0030	3,3	0,64300	195	699,7808
	0,0030	3,3	0,64300	210	702,6196
	0,0032	3,4	0,64300	225	678,8009
	0,0031	3,6	0,64300	240	731,1516
	0,0031	3,8	0,64300	255	768,3346
	0,0029	4,1	0,64300	270	903,0198
	0,0030	3,9	0,64300	285	837,2818
	0,0031	3,9	0,64300	300	820,4078
	0,0031	3,7	0,64300	315	772,0203
	0,0031	3,7	0,64300	330	766,2629
	0,0031	3,8	0,64300	345	773,6672
	0,0028	3,0	0,64300	360	689,3665
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,04	0,0033	4,1	0,42867	0	527,8257
	0,0034	4,1	0,42867	15	524,8663
	0,0036	4,2	0,42867	30	503,4648
	0,0037	4,6	0,42867	45	537,4007
	0,0037	4,8	0,42867	60	564,0585
	0,0036	5,0	0,42867	75	586,5790
	0,0032	5,0	0,42867	90	670,6883
	0,0034	5,2	0,42867	105	660,6695
	0,0034	5,1	0,42867	120	640,9184
	0,0036	4,7	0,42867	135	559,3559
	0,0036	4,7	0,42867	150	563,2790
	0,0035	4,7	0,42867	165	562,4265
	0,0033	4,1	0,42867	180	527,8257
	0,0034	4,1	0,42867	195	524,8663
	0,0036	4,2	0,42867	210	503,4648
	0,0037	4,6	0,42867	225	537,4007
	0,0037	4,8	0,42867	240	564,0585
	0,0036	5,0	0,42867	255	586,5790
	0,0032	5,0	0,42867	270	670,6883
	0,0034	5,2	0,42867	285	660,6695
	0,0034	5,1	0,42867	300	640,9184
	0,0036	4,7	0,42867	315	559,3559
	0,0036	4,7	0,42867	330	563,2790
	0,0035	4,7	0,42867	345	562,4265
	0,0033	4,1	0,42867	360	527,8257

ANEXO IV: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Quadrático para espaçamento de 8 e 10 cm. Etapa 1.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Quadrático - Fase 1					
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,1	0,0030	2,8	1,07167	0	997,1003
	0,0030	3,0	1,07167	15	1080,0918
	0,0030	3,2	1,07167	30	1120,9177
	0,0032	3,2	1,07167	45	1068,3269
	0,0032	3,7	1,07167	60	1220,9766
	0,0031	3,8	1,07167	75	1320,8448
	0,0029	3,3	1,07167	90	1206,3899
	0,0032	3,7	1,07167	105	1242,7321
	0,0034	3,1	1,07167	120	956,2935
	0,0035	3,2	1,07167	135	997,3367
	0,0034	3,1	1,07167	150	956,1815
	0,0033	3,1	1,07167	165	993,8897
	0,0030	2,8	1,07167	180	997,1003
	0,0030	3,0	1,07167	195	1080,0918
	0,0030	3,2	1,07167	210	1120,9177
	0,0032	3,2	1,07167	225	1068,3269
	0,0032	3,7	1,07167	240	1220,9766
	0,0031	3,8	1,07167	255	1320,8448
	0,0029	3,3	1,07167	270	1206,3899
	0,0032	3,7	1,07167	285	1242,7321
	0,0034	3,1	1,07167	300	956,2935
	0,0035	3,2	1,07167	315	997,3367
	0,0034	3,1	1,07167	330	956,1815
	0,0033	3,1	1,07167	345	993,8897
	0,0030	2,8	1,07167	360	997,1003
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,08	0,0026	2,6	0,85734	0	850,6919
	0,0027	2,8	0,85734	15	889,6313
	0,0028	3,0	0,85734	30	899,9568
	0,0029	3,0	0,85734	45	887,6429
	0,0029	3,1	0,85734	60	934,8261
	0,0029	3,6	0,85734	75	1055,7390
	0,0027	3,3	0,85734	90	1042,9823
	0,0029	3,3	0,85734	105	976,3313
	0,0030	3,3	0,85734	120	931,6614
	0,0032	3,1	0,85734	135	837,5511
	0,0031	3,1	0,85734	150	852,7434
	0,0031	3,0	0,85734	165	830,3110
	0,0026	2,6	0,85734	180	850,6919
	0,0027	2,8	0,85734	195	889,6313
	0,0028	3,0	0,85734	210	899,9568
	0,0029	3,0	0,85734	225	887,6429
	0,0029	3,1	0,85734	240	934,8261
	0,0029	3,6	0,85734	255	1055,7390
	0,0027	3,3	0,85734	270	1042,9823
	0,0029	3,3	0,85734	285	976,3313
	0,0030	3,3	0,85734	300	931,6614
	0,0032	3,1	0,85734	315	837,5511
	0,0031	3,1	0,85734	330	852,7434
	0,0031	3,0	0,85734	345	830,3110
	0,0026	2,6	0,85734	360	850,6919

ANEXO V: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Dipolo-dipolo Equatorial para espaçamento de 2 cm. Etapa 1.

		UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP					
Arranjo Dipolo-dipolo equatorial - Fase 1							
Espaçamento(m)	b	Corrente (A)	Voltagem (V)	L (m)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,02	0,1	0,0020	0,110	0,10198	32,339	0	1761,0304
		0,0020	0,140	0,10198	32,339	15	2256,2038
		0,0019	0,123	0,10198	32,339	30	2073,7263
		0,0019	0,137	0,10198	32,339	45	2313,9542
		0,0021	0,110	0,10198	32,339	60	1691,2590
		0,0024	0,220	0,10198	32,339	75	3023,1853
		0,0021	0,210	0,10198	32,339	90	3270,2280
		0,0022	0,147	0,10198	32,339	105	2165,7725
		0,0021	0,130	0,10198	32,339	120	2017,9487
		0,0021	0,137	0,10198	32,339	135	2141,9964
		0,0020	0,150	0,10198	32,339	150	2381,7536
		0,0020	0,133	0,10198	32,339	165	2188,7595
		0,0020	0,110	0,10198	32,339	180	1761,0304
		0,0020	0,140	0,10198	32,339	195	2256,2038
		0,0019	0,123	0,10198	32,339	210	2073,7263
		0,0019	0,137	0,10198	32,339	225	2313,9542
		0,0021	0,110	0,10198	32,339	240	1691,2590
		0,0024	0,220	0,10198	32,339	255	3023,1853
		0,0021	0,210	0,10198	32,339	270	3270,2280
		0,0022	0,147	0,10198	32,339	285	2165,7725
		0,0021	0,130	0,10198	32,339	300	2017,9487
		0,0021	0,137	0,10198	32,339	315	2141,9964
		0,0020	0,150	0,10198	32,339	330	2381,7536
		0,0020	0,133	0,10198	32,339	345	2188,7595
		0,0020	0,110	0,10198	32,339	360	1761,0304

ANEXO VI: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Dipolo-dipolo Equatorial para espaçamento de 3 cm. Etapa 1.

		UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP					
Arranjo Dipolo-Dipolo equatorial - Fase 1							
Espaçamento(m)	b	Corrente (A)	Voltagem (V)	L	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,03	0,15	0,0030	0,153	0,15297	48,508382	0	2504,3609
		0,0032	0,170	0,15297	48,508382	15	2615,1453
		0,0031	0,173	0,15297	48,508382	30	2756,7605
		0,0030	0,173	0,15297	48,508382	45	2790,3052
		0,0030	0,167	0,15297	48,508382	60	2665,2957
		0,0030	0,160	0,15297	48,508382	75	2584,2423
		0,0028	0,200	0,15297	48,508382	90	3523,6113
		0,0029	0,143	0,15297	48,508382	105	2431,0728
		0,0029	0,160	0,15297	48,508382	120	2648,9219
		0,0029	0,140	0,15297	48,508382	135	2363,5174
		0,0030	0,143	0,15297	48,508382	150	2346,2997
		0,0029	0,160	0,15297	48,508382	165	2685,5852
		0,0030	0,153	0,15297	48,508382	180	2504,3609
		0,0032	0,170	0,15297	48,508382	195	2615,1453
		0,0031	0,173	0,15297	48,508382	210	2756,7605
		0,0030	0,173	0,15297	48,508382	225	2790,3052
		0,0030	0,167	0,15297	48,508382	240	2665,2957
		0,0030	0,160	0,15297	48,508382	255	2584,2423
		0,0028	0,200	0,15297	48,508382	270	3523,6113
		0,0029	0,143	0,15297	48,508382	285	2431,0728
		0,0029	0,160	0,15297	48,508382	300	2648,9219
		0,0029	0,140	0,15297	48,508382	315	2363,5174
		0,0030	0,143	0,15297	48,508382	330	2346,2997
		0,0029	0,160	0,15297	48,508382	345	2685,5852
		0,0030	0,153	0,15297	48,508382	360	2504,3609

ANEXO VII: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Dipolo-dipolo Equatorial para espaçamento de 4 cm. Etapa 1.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>						
Arranjo Dipolo-Dipolo equatorial - Fase 1						
Espaçamento(m)	b	Corrente (A)	Voltagem (V)	L (m)	Fator K	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,04	0,2	0,00213	0,103	0,20396	64,677851	3132,8334
		0,00223	0,093	0,20396	64,677851	2702,9550
		0,00230	0,090	0,20396	64,677851	2530,8724
		0,00230	0,070	0,20396	64,677851	1968,4563
		0,00250	0,060	0,20396	64,677851	1552,2684
		0,00243	0,093	0,20396	64,677851	2480,7943
		0,00260	0,130	0,20396	64,677851	3233,8926
		0,00240	0,113	0,20396	64,677851	3054,2319
		0,00240	0,120	0,20396	64,677851	3233,8926
		0,00237	0,123	0,20396	64,677851	3370,5359
		0,00237	0,100	0,20396	64,677851	2732,8670
		0,00233	0,093	0,20396	64,677851	2587,1141
		0,00213	0,103	0,20396	64,677851	3132,8334
		0,00223	0,093	0,20396	64,677851	2702,9550
		0,00230	0,090	0,20396	64,677851	2530,8724
		0,00230	0,070	0,20396	64,677851	1968,4563
		0,00250	0,060	0,20396	64,677851	1552,2684
		0,00243	0,093	0,20396	64,677851	2480,7943
		0,00260	0,130	0,20396	64,677851	3233,8926
		0,00240	0,113	0,20396	64,677851	3054,2319
		0,00240	0,120	0,20396	64,677851	3233,8926
		0,00237	0,123	0,20396	64,677851	3370,5359
		0,00237	0,100	0,20396	64,677851	2732,8670
		0,00233	0,093	0,20396	64,677851	2587,1141
		0,00213	0,103	0,20396	64,677851	3132,8334

ANEXO VIII: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Schlumberger. Etapa 1.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>						
Arranjo Schlumberger - Fase 1						
Espaçamento MN (m)	Espaçamento AB (m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade Aparente (Ohm. m)
0,04	0,2	0,00309	2,99	0,75398	0	730,3694
		0,00319	3,08	0,75398	15	728,7707
		0,00312	3,17	0,75398	30	766,8708
		0,00298	3,16	0,75398	45	797,7890
		0,00292	3,19	0,75398	60	823,7794
		0,00298	3,31	0,75398	75	837,4769
		0,00298	3,47	0,75398	90	876,9782
		0,00310	3,40	0,75398	105	827,8384
		0,00308	3,41	0,75398	120	833,9500
		0,00312	3,36	0,75398	135	813,6557
		0,00312	3,34	0,75398	150	805,4816
		0,00313	3,08	0,75398	165	743,5326
		0,00309	2,99	0,75398	180	730,3694
		0,00319	3,08	0,75398	195	728,7707
		0,00312	3,17	0,75398	210	766,8708
		0,00298	3,16	0,75398	225	797,7890
		0,00292	3,19	0,75398	240	823,7794
		0,00298	3,31	0,75398	255	837,4769
		0,00298	3,47	0,75398	270	876,9782
		0,00310	3,40	0,75398	285	827,8384
		0,00308	3,41	0,75398	300	833,9500
		0,00312	3,36	0,75398	315	813,6557
		0,00312	3,34	0,75398	330	805,4816
		0,00313	3,08	0,75398	345	743,5326
		0,00309	2,99	0,75398	360	730,3694

ANEXO IX: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Wenner para espaçamento de 4 e 6 cm. Etapa 2.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP Arranjo Wenner - Fase 2 </div> </div>					
Espacamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute(°)	Fator k	Resistividade aparente (ohm.m)
0,04	0,00287	3,77667	0	0,2512	330,9414
	0,00277	3,80000	15	0,2512	345,0217
	0,00278	3,72000	30	0,2512	336,5417
	0,00268	3,72000	45	0,2512	348,2475
	0,00282	3,82667	60	0,2512	340,8719
	0,00281	3,63333	75	0,2512	324,4171
	0,00279	3,65000	90	0,2512	328,6308
	0,00287	3,64333	105	0,2512	318,8869
	0,00288	3,75667	120	0,2512	328,0445
	0,00302	3,83000	135	0,2512	318,5748
	0,00284	3,56000	150	0,2512	314,5154
	0,00299	3,64667	165	0,2512	306,7107
	0,00287	3,77667	180	0,2512	330,9414
	0,00277	3,80000	195	0,2512	345,0217
	0,00278	3,72000	210	0,2512	336,5417
	0,00268	3,72000	225	0,2512	348,2475
	0,00282	3,82667	240	0,2512	340,8719
	0,00281	3,63333	255	0,2512	324,4171
	0,00279	3,65000	270	0,2512	328,6308
	0,00287	3,64333	285	0,2512	318,8869
	0,00288	3,75667	300	0,2512	328,0445
	0,00302	3,83000	315	0,2512	318,5748
	0,00284	3,56000	330	0,2512	314,5154
	0,00299	3,64667	345	0,2512	306,7107
	0,00287	3,77667	360	0,2512	330,9414
Espacamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute(°)	Fator k	Resistividade aparente (ohm.m)
0,06	0,0028	2,913	0	0,3768	394,8719
	0,0024	2,510	15	0,3768	400,1839
	0,0025	2,690	30	0,3768	403,2859
	0,0026	2,913	45	0,3768	414,7647
	0,0025	2,693	60	0,3768	405,3987
	0,0026	2,753	75	0,3768	403,6794
	0,0026	2,860	90	0,3768	420,4088
	0,0026	2,917	105	0,3768	429,8566
	0,0026	2,983	120	0,3768	426,8810
	0,0026	2,857	135	0,3768	417,7459
	0,0026	2,380	150	0,3768	348,4912
	0,0025	2,443	165	0,3768	368,7509
	0,0028	2,913	180	0,3768	394,8719
	0,0024	2,510	195	0,3768	400,1839
	0,0025	2,690	210	0,3768	403,2859
	0,0026	2,913	225	0,3768	414,7647
	0,0025	2,693	240	0,3768	405,3987
	0,0026	2,753	255	0,3768	403,6794
	0,0026	2,860	270	0,3768	420,4088
	0,0026	2,917	285	0,3768	429,8566
	0,0026	2,983	300	0,3768	426,8810
	0,0026	2,857	315	0,3768	417,7459
	0,0026	2,380	330	0,3768	348,4912
	0,0025	2,443	345	0,3768	368,7509
	0,0028	2,913	360	0,3768	394,8719

ANEXO X: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Wenner para espaçamento de 8 e 10 cm. Etapa 2.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Wenner - Fase 2					
Espacamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute(°)	Fator k	Resistividade aparente (ohm.m)
0,08	0,00279	2,487	0	0,5024	448,3139
	0,00254	2,303	15	0,5024	456,1871
	0,00256	2,517	30	0,5024	494,5398
	0,00259	2,433	45	0,5024	472,6186
	0,00258	2,560	60	0,5024	499,1503
	0,00268	2,627	75	0,5024	491,7903
	0,00262	2,640	90	0,5024	506,8800
	0,00260	2,573	105	0,5024	496,6105
	0,00253	2,560	120	0,5024	509,0280
	0,00274	2,710	135	0,5024	497,5045
	0,00260	2,443	150	0,5024	471,5227
	0,00264	2,563	165	0,5024	487,1950
	0,00279	2,487	180	0,5024	448,3139
	0,00254	2,303	195	0,5024	456,1871
	0,00256	2,517	210	0,5024	494,5398
	0,00259	2,433	225	0,5024	472,6186
	0,00258	2,560	240	0,5024	499,1503
	0,00268	2,627	255	0,5024	491,7903
	0,00262	2,640	270	0,5024	506,8800
	0,00260	2,573	285	0,5024	496,6105
	0,00253	2,560	300	0,5024	509,0280
	0,00274	2,710	315	0,5024	497,5045
	0,00260	2,443	330	0,5024	471,5227
	0,00264	2,563	345	0,5024	487,1950
	0,00279	2,487	360	0,5024	448,3139
Espacamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute(°)	Fator k	Resistividade aparente (ohm.m)
0,1	0,00229	2	0	0,628	547,6744
	0,00238	2,1	15	0,628	553,3427
	0,00240	2,14	30	0,628	560,7455
	0,00230	2,117	45	0,628	577,9420
	0,00242	2,273	60	0,628	589,9394
	0,00237	2,24	75	0,628	593,5527
	0,00241	2,273	90	0,628	591,5691
	0,00232	2,21	105	0,628	598,2241
	0,00228	2,117	120	0,628	583,8653
	0,00229	2,1	135	0,628	576,7347
	0,00221	1,977	150	0,628	562,5438
	0,00246	2,233	165	0,628	570,9091
	0,00229	2	180	0,628	547,6744
	0,00238	2,1	195	0,628	553,3427
	0,00240	2,14	210	0,628	560,7455
	0,00230	2,1167	225	0,628	577,9420
	0,00242	2,2733	240	0,628	589,9394
	0,00237	2,24	255	0,628	593,5527
	0,00241	2,2733	270	0,628	591,5691
	0,00232	2,21	285	0,628	598,2241
	0,00228	2,1167	300	0,628	583,8653
	0,00229	2,1	315	0,628	576,7347
	0,00221	1,977	330	0,628	562,5438
	0,00246	2,233	345	0,628	570,9091
	0,00229	2	360	0,628	547,6744

ANEXO XI: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Quadrático para espaçamento de 4 e 6 cm. Etapa 2.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Quadrático - Fase 2					
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,04	0,0031	2,0267	0,429	0	282,0679
	0,0030	1,9967	0,429	15	285,9384
	0,0030	2,2133	0,429	30	316,2624
	0,0031	2,0833	0,429	45	291,2153
	0,0031	1,9300	0,429	60	266,8810
	0,0030	1,8933	0,429	75	267,2711
	0,0031	2,0067	0,429	90	281,7235
	0,0029	1,6933	0,429	105	249,1577
	0,0027	1,2200	0,429	120	191,3327
	0,0028	2,5800	0,429	135	394,5181
	0,0028	2,6900	0,429	150	417,2929
	0,0029	2,7400	0,429	165	405,0182
	0,0031	2,0267	0,429	180	282,0679
	0,0030	1,9967	0,429	195	285,9384
	0,0030	2,2133	0,429	210	316,2624
	0,0031	2,0833	0,429	225	291,2153
	0,0031	1,9300	0,429	240	266,8810
	0,0030	1,8933	0,429	255	267,2711
	0,0031	2,0067	0,429	270	281,7235
	0,0029	1,6933	0,429	285	249,1577
	0,0027	1,2200	0,429	300	191,3327
	0,0028	2,5800	0,429	315	394,5181
	0,0028	2,6900	0,429	330	417,2929
	0,0029	2,7400	0,429	345	405,0182
	0,0031	2,0267	0,429	360	282,0679
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,06	0,0030	1,7967	0,643	0	388,9774
	0,0029	1,7000	0,643	15	380,8731
	0,0028	1,6733	0,643	30	379,7503
	0,0029	1,6367	0,643	45	368,3952
	0,0029	1,6700	0,643	60	369,8562
	0,0030	1,5500	0,643	75	337,8493
	0,0031	1,7400	0,643	90	362,8625
	0,0028	1,5900	0,643	105	369,5333
	0,0028	1,7500	0,643	120	404,7683
	0,0028	1,6900	0,643	135	384,8911
	0,0028	1,7500	0,643	150	408,6886
	0,0028	1,9267	0,643	165	445,6307
	0,0030	1,7967	0,643	180	388,9774
	0,0029	1,7000	0,643	195	380,8731
	0,0028	1,6733	0,643	210	379,7503
	0,0029	1,6367	0,643	225	368,3952
	0,0029	1,6700	0,643	240	369,8562
	0,0030	1,5500	0,643	255	337,8493
	0,0031	1,7400	0,643	270	362,8625
	0,0028	1,5900	0,643	285	369,5333
	0,0028	1,7500	0,643	300	404,7683
	0,0028	1,6900	0,643	315	384,8911
	0,0028	1,7500	0,643	330	408,6886
	0,0028	1,9267	0,643	345	445,6307
	0,0030	1,7967	0,643	360	388,9774

ANEXO XII: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Quadrático para espaçamento de 8 e 10 cm. Etapa 2.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Quadrático - Fase 2					
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,08	0,00292	1,5967	0,857	0	468,2609
	0,00292	1,5100	0,857	15	443,8561
	0,00307	1,6033	0,857	30	448,2386
	0,00300	1,5600	0,857	45	445,3209
	0,00297	1,5600	0,857	60	450,3189
	0,00304	1,5000	0,857	75	423,0286
	0,00298	1,5633	0,857	90	450,2704
	0,00292	1,5500	0,857	105	455,6138
	0,00303	1,6100	0,857	120	455,5492
	0,00284	1,5167	0,857	135	457,8506
	0,00278	1,5333	0,857	150	473,4399
	0,00280	1,5300	0,857	165	467,9169
	0,00292	1,5967	0,857	180	468,2609
	0,00292	1,5100	0,857	195	443,8561
	0,00307	1,6033	0,857	210	448,2386
	0,00300	1,5600	0,857	225	445,3209
	0,00297	1,5600	0,857	240	450,3189
	0,00304	1,5000	0,857	255	423,0286
	0,00298	1,5633	0,857	270	450,2704
	0,00292	1,5500	0,857	285	455,6138
	0,00303	1,6100	0,857	300	455,5492
	0,00284	1,5167	0,857	315	457,8506
	0,00278	1,5333	0,857	330	473,4399
	0,00280	1,5300	0,857	345	467,9169
	0,00292	1,5967	0,857	360	468,2609
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,1	0,00294	1,3967	1,072	0	509,1051
	0,0027	1,2800	1,072	15	508,0521
	0,00283	1,3200	1,072	30	500,4508
	0,00281	1,3400	1,072	45	510,4411
	0,00279	1,2700	1,072	60	488,4057
	0,00281	1,2833	1,072	75	490,0165
	0,00298	1,4033	1,072	90	505,2341
	0,00284	1,4500	1,072	105	547,7996
	0,00282	1,3800	1,072	120	523,8162
	0,00281	1,3800	1,072	135	526,3017
	0,00284	1,3600	1,072	150	513,1952
	0,00263	1,3233	1,072	165	539,9161
	0,00294	1,3967	1,072	180	509,1051
	0,0027	1,2800	1,072	195	508,0521
	0,00283	1,3200	1,072	210	500,4508
	0,00281	1,3400	1,072	225	510,4411
	0,00279	1,2700	1,072	240	488,4057
	0,00281	1,2833	1,072	255	490,0165
	0,00298	1,4033	1,072	270	505,2341
	0,00284	1,4500	1,072	285	547,7996
	0,00282	1,3800	1,072	300	523,8162
	0,00281	1,3800	1,072	315	526,3017
	0,00284	1,3600	1,072	330	513,1952
	0,00263	1,3233	1,072	345	539,9161
	0,00294	1,3967	1,072	360	509,1051

ANEXO XIII: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Dipolo-dipolo Equatorial para espaçamentos de 2, 3 e 4 cm. Etapa 2.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>							
Arranjo Dipolo-Dipolo equatorial - Fase 2							
Espaçamento(m)	b	Corrente (A)	Voltagem (V)	L (m)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,02	0,1	0,0032	0,1333	0,1020	32,339	0	1355,9296
		0,0033	0,1533	0,1020	32,339	15	1522,6104
		0,0033	0,1133	0,1020	32,339	30	1123,1086
		0,0033	0,0600	0,1020	32,339	45	580,3595
		0,0033	0,1000	0,1020	32,339	60	972,1119
		0,0034	0,1800	0,1020	32,339	75	1717,1109
		0,0040	0,1200	0,1020	32,339	90	970,1676
		0,0037	0,1333	0,1020	32,339	105	1169,5812
		0,0036	0,1433	0,1020	32,339	120	1303,2555
		0,0036	0,1567	0,1020	32,339	135	1413,8877
		0,0034	0,1433	0,1020	32,339	150	1348,7620
		0,0031	0,1333	0,1020	32,339	165	1410,6400
		0,0032	0,1333	0,1020	32,339	180	1355,9296
		0,0033	0,1533	0,1020	32,339	195	1522,6104
		0,0033	0,1133	0,1020	32,339	210	1123,1086
		0,0033	0,0600	0,1020	32,339	225	580,3595
		0,0033	0,1000	0,1020	32,339	240	972,1119
		0,0034	0,1800	0,1020	32,339	255	1717,1109
		0,0040	0,1200	0,1020	32,339	270	970,1676
		0,0037	0,1333	0,1020	32,339	285	1169,5812
		0,0036	0,1433	0,1020	32,339	300	1303,2555
		0,0036	0,1567	0,1020	32,339	315	1413,8877
		0,0034	0,1433	0,1020	32,339	330	1348,7620
		0,0031	0,1333	0,1020	32,339	345	1410,6400
		0,0032	0,1333	0,1020	32,339	360	1355,9296
0,03	0,15	0,0030	0,1200	0,152971	48,51	0	1966,5560
		0,0029	0,1367	0,152971	48,51	15	2257,4843
		0,0029	0,0967	0,152971	48,51	30	1637,6520
		0,0031	0,1100	0,152971	48,51	45	1745,6670
		0,0031	0,1100	0,152971	48,51	60	1743,7654
		0,0031	0,1667	0,152971	48,51	75	2639,1938
		0,0027	0,1100	0,152971	48,51	90	1942,6901
		0,0033	0,1200	0,152971	48,51	105	1755,0771
		0,0032	0,1233	0,152971	48,51	120	1889,2738
		0,0029	0,1033	0,152971	48,51	135	1726,4751
		0,0029	0,1300	0,152971	48,51	150	2164,5617
		0,0031	0,1267	0,152971	48,51	165	1999,2609
		0,0030	0,1200	0,152971	48,51	180	1966,5560
		0,0029	0,1367	0,152971	48,51	195	2257,4843
		0,0029	0,0967	0,152971	48,51	210	1637,6520
		0,0031	0,1100	0,152971	48,51	225	1745,6670
		0,0031	0,1100	0,152971	48,51	240	1743,7654
		0,0031	0,1667	0,152971	48,51	255	2639,1938
		0,0027	0,1100	0,152971	48,51	270	1942,6901
		0,0033	0,1200	0,152971	48,51	285	1755,0771
		0,0032	0,1233	0,152971	48,51	300	1889,2738
		0,0029	0,1033	0,152971	48,51	315	1726,4751
		0,0029	0,1300	0,152971	48,51	330	2164,5617
		0,0031	0,1267	0,152971	48,51	345	1999,2609
		0,0030	0,1200	0,152971	48,51	360	1966,5560
0,04	0,2	0,00331	0,10333	0,203961	64,678	0	2017,1161
		0,00339	0,10333	0,203961	64,678	15	1973,4384
		0,00341	0,10333	0,203961	64,678	30	1961,8526
		0,00333	0,11333	0,203961	64,678	45	2201,2482
		0,00344	0,11667	0,203961	64,678	60	2191,4083
		0,00348	0,13000	0,203961	64,678	75	2416,1266
		0,00348	0,12000	0,203961	64,678	90	2230,2707
		0,00351	0,13333	0,203961	64,678	105	2459,2339
		0,00343	0,11333	0,203961	64,678	120	2139,1507
		0,00350	0,12000	0,203961	64,678	135	2217,5263
		0,00355	0,11333	0,203961	64,678	150	2062,8958
		0,00348	0,10000	0,203961	64,678	165	1860,3409
		0,00331	0,10333	0,203961	64,678	180	2017,1161
		0,00339	0,10333	0,203961	64,678	195	1973,4384
		0,00341	0,10333	0,203961	64,678	210	1961,8526
		0,00333	0,11333	0,203961	64,678	225	2201,2482
		0,00344	0,11667	0,203961	64,678	240	2191,4083
		0,00348	0,13000	0,203961	64,678	255	2416,1266
		0,00348	0,12000	0,203961	64,678	270	2230,2707
		0,00351	0,13333	0,203961	64,678	285	2459,2339
		0,00343	0,11333	0,203961	64,678	300	2139,1507
		0,00350	0,12000	0,203961	64,678	315	2217,5263
		0,00355	0,11333	0,203961	64,678	330	2062,8958
		0,00348	0,10000	0,203961	64,678	345	1860,3409
		0,00331	0,10333	0,203961	64,678	360	2017,1161

ANEXO XIV: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Schlumberger. Etapa 2.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>						
Arranjo Schlumberger - Fase 2						
Espaçamento MN (m)	Espaçamento AB (m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,04	0,2	0,00267	1,56	0,75398	0	440,5289
		0,00274667	1,71333333	0,75398	15	470,3239
		0,0027	1,73333333	0,75398	30	484,0380
		0,00266667	1,64666667	0,75398	45	465,5840
		0,00285	1,72666667	0,75398	60	456,7986
		0,00273667	1,73	0,75398	75	476,6343
		0,00291667	1,79	0,75398	90	462,7297
		0,00293333	1,82	0,75398	105	467,8117
		0,00287	1,73666667	0,75398	120	456,2424
		0,00293	1,79333333	0,75398	135	461,4817
		0,00287	1,68666667	0,75398	150	443,1069
		0,00306	1,70333333	0,75398	165	419,7004
		0,00267	1,56	0,75398	180	440,5289
		0,00274667	1,71333333	0,75398	195	470,3239
		0,0027	1,73333333	0,75398	210	484,0380
		0,00266667	1,64666667	0,75398	225	465,5840
		0,00285	1,72666667	0,75398	240	456,7986
		0,00273667	1,73	0,75398	255	476,6343
		0,00291667	1,79	0,75398	270	462,7297
		0,00293333	1,82	0,75398	285	467,8117
		0,00287	1,73666667	0,75398	300	456,2424
		0,00293	1,79333333	0,75398	315	461,4817
		0,00287	1,68666667	0,75398	330	443,1069
		0,00306	1,70333333	0,75398	345	419,7004
		0,00267	1,56	0,75398	360	440,5289

ANEXO XV: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Wenner para espaçamento de 4 e 6 cm. Etapa 3.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Wenner - Fase 3					
Espacamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute(°)	Fator k	Resistividade aparente (ohm.m)
0,04	0,0011	2,817	0	0,2512	622,4751
	0,0011	2,700	15	0,2512	593,2128
	0,0012	2,723	30	0,2512	594,8707
	0,0012	2,793	45	0,2512	608,3977
	0,0012	2,883	60	0,2512	606,9497
	0,0012	2,907	75	0,2512	620,5280
	0,0012	3,000	90	0,2512	628,0000
	0,0011	2,853	105	0,2512	643,7940
	0,0012	2,877	120	0,2512	626,5480
	0,0012	3,047	135	0,2512	623,9043
	0,0011	2,690	150	0,2512	641,5139
	0,0011	2,743	165	0,2512	624,5849
	0,0011	2,817	180	0,2512	622,4751
	0,0011	2,700	195	0,2512	593,2128
	0,0012	2,723	210	0,2512	594,8707
	0,0012	2,793	225	0,2512	608,3977
	0,0012	2,883	240	0,2512	606,9497
	0,0012	2,907	255	0,2512	620,5280
	0,0012	3,000	270	0,2512	628,0000
	0,0011	2,853	285	0,2512	643,7940
	0,0012	2,877	300	0,2512	626,5480
	0,0012	3,047	315	0,2512	623,9043
	0,0011	2,690	330	0,2512	641,5139
	0,0011	2,743	345	0,2512	624,5849
	0,0011	2,817	360	0,2512	622,4751
Espacamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute(°)	Fator k	Resistividade aparente (ohm.m)
0,06	0,0014	2,153	0	0,3768	601,0193
	0,0013	2,040	15	0,3768	602,0930
	0,0013	2,100	30	0,3768	600,9722
	0,0013	2,180	45	0,3768	619,1638
	0,0013	2,067	60	0,3768	621,3191
	0,0013	2,130	75	0,3768	615,7934
	0,0012	1,970	90	0,3768	615,1624
	0,0013	2,257	105	0,3768	631,4198
	0,0014	2,243	120	0,3768	626,1393
	0,0013	2,177	135	0,3768	615,1260
	0,0013	2,213	150	0,3768	639,8854
	0,0014	2,257	165	0,3768	611,7353
	0,0014	2,153	180	0,3768	601,0193
	0,0013	2,040	195	0,3768	602,0930
	0,0013	2,100	210	0,3768	600,9722
	0,0013	2,180	225	0,3768	619,1638
	0,0013	2,067	240	0,3768	621,3191
	0,0013	2,130	255	0,3768	615,7934
	0,0012	1,970	270	0,3768	615,1624
	0,0013	2,257	285	0,3768	631,4198
	0,0014	2,243	300	0,3768	626,1393
	0,0013	2,177	315	0,3768	615,1260
	0,0013	2,213	330	0,3768	639,8854
	0,0014	2,257	345	0,3768	611,7353
	0,0014	2,153	360	0,3768	601,0193

ANEXO XVI: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Wenner para espaçamento de 8 e 10 cm. Etapa 3.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Wenner - Fase 3					
Espacamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute(°)	Fator k	Resistividade aparente (ohm.m)
0,08	0,00145	1,7133	0	0,5024	592,2789
	0,00147	1,7067	15	0,5024	584,6109
	0,00149	1,7633	30	0,5024	593,2357
	0,00145	1,7433	45	0,5024	604,0349
	0,00152	1,7867	60	0,5024	591,8382
	0,00146	1,7333	75	0,5024	597,8215
	0,00142	1,7267	90	0,5024	609,4689
	0,00141	1,7100	105	0,5024	609,2936
	0,00142	1,6333	120	0,5024	576,5246
	0,00142	1,6967	135	0,5024	598,8796
	0,00153	1,7167	150	0,5024	564,9258
	0,00156	1,8533	165	0,5024	596,8684
	0,00145	1,7133	180	0,5024	592,2789
	0,00147	1,7067	195	0,5024	584,6109
	0,00149	1,7633	210	0,5024	593,2357
	0,00145	1,7433	225	0,5024	604,0349
	0,00152	1,7867	240	0,5024	591,8382
	0,00146	1,7333	255	0,5024	597,8215
	0,00142	1,7267	270	0,5024	609,4689
	0,00141	1,7100	285	0,5024	609,2936
	0,00142	1,6333	300	0,5024	576,5246
	0,00142	1,6967	315	0,5024	598,8796
	0,00153	1,7167	330	0,5024	564,9258
	0,00156	1,8533	345	0,5024	596,8684
	0,00145	1,7133	360	0,5024	592,2789
espacamento(m)	corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute(°)	fator k	resistividade aparente (ohm.m)
0,1	0,0014	1,3633	0	0,628	594,5648
	0,0014	1,3233	15	0,628	593,6095
	0,0015	1,4500	30	0,628	620,8636
	0,0014	1,4133	45	0,628	625,0516
	0,0016	1,6167	60	0,628	634,5417
	0,0016	1,5400	75	0,628	622,6094
	0,0014	1,3267	90	0,628	599,3861
	0,0014	1,2933	105	0,628	589,9855
	0,0014	1,3200	120	0,628	586,5283
	0,0014	1,3367	135	0,628	587,0117
	0,0015	1,4100	150	0,628	602,3673
	0,0015	1,4533	165	0,628	603,1013
	0,0014	1,3633	180	0,628	594,5648
	0,0014	1,3233	195	0,628	593,6095
	0,0015	1,4500	210	0,628	620,8636
	0,0014	1,4133	225	0,628	625,0516
	0,0016	1,6167	240	0,628	634,5417
	0,0016	1,5400	255	0,628	622,6094
	0,0014	1,3267	270	0,628	599,3861
	0,0014	1,2933	285	0,628	589,9855
	0,0014	1,3200	300	0,628	586,5283
	0,0014	1,3367	315	0,628	587,0117
	0,0015	1,4100	330	0,628	602,3673
	0,0015	1,4533	345	0,628	603,1013
	0,0014	1,3633	360	0,628	594,5648

ANEXO XVII: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Quadrático para espaçamento de 4 e 6 cm. Etapa 3.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Quadrático - Fase 3					
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,04	0,00274	2,90667	0,4287	0	455,2976
	0,00252	2,61667	0,4287	15	445,1126
	0,00267	2,42000	0,4287	30	388,5314
	0,00250	2,19667	0,4287	45	377,1600
	0,00248	1,87000	0,4287	60	323,2302
	0,00251	1,87000	0,4287	75	318,9433
	0,00224	2,09000	0,4287	90	399,9634
	0,00222	2,07667	0,4287	105	400,9921
	0,00237	2,30667	0,4287	120	417,2137
	0,00236	2,28667	0,4287	135	415,3487
	0,00237	2,36667	0,4287	150	428,6689
	0,00228	2,41000	0,4287	165	453,7740
	0,00274	2,90667	0,4287	180	455,2976
	0,00252	2,61667	0,4287	195	445,1126
	0,00267	2,42000	0,4287	210	388,5314
	0,00250	2,19667	0,4287	225	377,1600
	0,00248	1,87000	0,4287	240	323,2302
	0,00251	1,87000	0,4287	255	318,9433
	0,00224	2,09000	0,4287	270	399,9634
	0,00222	2,07667	0,4287	285	400,9921
	0,00237	2,30667	0,4287	300	417,2137
	0,00236	2,28667	0,4287	315	415,3487
	0,00237	2,36667	0,4287	330	428,6689
	0,00228	2,41000	0,4287	345	453,7740
	0,00274	2,90667	0,4287	360	455,2976
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,06	0,00188	1,39000	0,6430	0	476,2565
	0,00161	1,24667	0,6430	15	498,9280
	0,00178	1,26667	0,6430	30	458,4264
	0,00178	1,32333	0,6430	45	478,0381
	0,00166	1,17333	0,6430	60	454,4924
	0,00179	1,29000	0,6430	75	462,5322
	0,00164	1,36667	0,6430	90	535,8362
	0,00160	1,33333	0,6430	105	534,7222
	0,00155	1,29667	0,6430	120	539,0697
	0,00153	1,29000	0,6430	135	542,1401
	0,00165	1,40333	0,6430	150	546,8777
	0,00163	1,43000	0,6430	165	562,9560
	0,00188	1,39000	0,6430	180	476,2565
	0,00161	1,24667	0,6430	195	498,9280
	0,00178	1,26667	0,6430	210	458,4264
	0,00178	1,32333	0,6430	225	478,0381
	0,00166	1,17333	0,6430	240	454,4924
	0,00179	1,29000	0,6430	255	462,5322
	0,00164	1,36667	0,6430	270	535,8362
	0,00160	1,33333	0,6430	285	534,7222
	0,00155	1,29667	0,6430	300	539,0697
	0,00153	1,29000	0,6430	315	542,1401
	0,00165	1,40333	0,6430	330	546,8777
	0,00163	1,43000	0,6430	345	562,9560
	0,00188	1,39000	0,6430	360	476,2565

ANEXO XVIII: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Quadrático para espaçamento de 8 e 10 cm. Etapa 3.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Quadrático - Fase 3					
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,08	0,0018	1,4467	0,8573	0	692,8950
	0,0018	1,3900	0,8573	15	653,5830
	0,0018	1,3900	0,8573	30	669,4942
	0,0018	1,2967	0,8573	45	629,2537
	0,0018	1,3367	0,8573	60	620,5641
	0,0018	1,2633	0,8573	75	602,8406
	0,0018	1,2900	0,8573	90	623,6650
	0,0018	1,3333	0,8573	105	633,8912
	0,0019	1,4233	0,8573	120	649,0838
	0,0018	1,4833	0,8573	135	688,6559
	0,0017	1,4933	0,8573	150	748,7083
	0,0018	1,7833	0,8573	165	849,3996
	0,0018	1,4467	0,8573	180	692,8950
	0,0018	1,3900	0,8573	195	653,5830
	0,0018	1,3900	0,8573	210	669,4942
	0,0018	1,2967	0,8573	225	629,2537
	0,0018	1,3367	0,8573	240	620,5641
	0,0018	1,2633	0,8573	255	602,8406
	0,0018	1,2900	0,8573	270	623,6650
	0,0018	1,3333	0,8573	285	633,8912
	0,0019	1,4233	0,8573	300	649,0838
	0,0018	1,4833	0,8573	315	688,6559
	0,0017	1,4933	0,8573	330	748,7083
	0,0018	1,7833	0,8573	345	849,3996
	0,0018	1,4467	0,8573	360	692,8950
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,1	0,0018	0,9833	1,0717	0	602,1778
	0,0014	0,7233	1,0717	15	547,1833
	0,0015	0,7767	1,0717	30	546,3887
	0,0017	0,8367	1,0717	45	522,3102
	0,0016	0,8300	1,0717	60	542,3708
	0,0014	0,7200	1,0717	75	570,1508
	0,0016	0,7300	1,0717	90	490,9963
	0,0014	0,6933	1,0717	105	519,5987
	0,0014	0,6767	1,0717	120	501,2661
	0,0015	0,7700	1,0717	135	534,6789
	0,0014	0,7033	1,0717	150	530,8049
	0,0014	0,7367	1,0717	165	555,9615
	0,0018	0,9833	1,0717	180	602,1778
	0,0014	0,7233	1,0717	195	547,1833
	0,0015	0,7767	1,0717	210	546,3887
	0,0017	0,8367	1,0717	225	522,3102
	0,0016	0,8300	1,0717	240	542,3708
	0,0014	0,7200	1,0717	255	570,1508
	0,0016	0,7300	1,0717	270	490,9963
	0,0014	0,6933	1,0717	285	519,5987
	0,0014	0,6767	1,0717	300	501,2661
	0,0015	0,7700	1,0717	315	534,6789
	0,0014	0,7033	1,0717	330	530,8049
	0,0014	0,7367	1,0717	345	555,9615
	0,0018	0,9833	1,0717	360	602,1778

ANEXO XIX: Dados do levantamento azimuthal, Arranjo Dipolo-dipolo Equatorial para espaçamento de 2 e 3 cm. Etapa 3.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>							
Arranjo Dipolo-Dipolo equatorial - Fase 3							
Espaçamento(m)	b	Corrente (A)	Voltagem (V)	L (m)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,02	0,1	0,0025	0,09667	0,1020	32,3389	0	1267,3361
		0,0024	0,08667	0,1020	32,3389	15	1172,6805
		0,0024	0,08000	0,1020	32,3389	30	1096,2346
		0,0024	0,11333	0,1020	32,3389	45	1542,1084
		0,0023	0,08667	0,1020	32,3389	60	1216,8046
		0,0022	0,10333	0,1020	32,3389	75	1523,5662
		0,0019	0,05000	0,1020	32,3389	90	858,5554
		0,0021	0,06000	0,1020	32,3389	105	941,9103
		0,0021	0,06000	0,1020	32,3389	120	940,3887
		0,0021	0,07000	0,1020	32,3389	135	1066,1183
		0,0024	0,07333	0,1020	32,3389	150	986,7632
		0,0024	0,07333	0,1020	32,3389	165	993,6540
		0,0025	0,09667	0,1020	32,3389	180	1267,3361
		0,0024	0,08667	0,1020	32,3389	195	1172,6805
		0,0024	0,08000	0,1020	32,3389	210	1096,2346
		0,0024	0,11333	0,1020	32,3389	225	1542,1084
		0,0023	0,08667	0,1020	32,3389	240	1216,8046
		0,0022	0,10333	0,1020	32,3389	255	1523,5662
		0,0019	0,05000	0,1020	32,3389	270	858,5554
		0,0021	0,06000	0,1020	32,3389	285	941,9103
		0,0021	0,06000	0,1020	32,3389	300	940,3887
		0,0021	0,07000	0,1020	32,3389	315	1066,1183
		0,0024	0,07333	0,1020	32,3389	330	986,7632
		0,0024	0,07333	0,1020	32,3389	345	993,6540
		0,0025	0,09667	0,1020	32,3389	360	1267,3361
Espaçamento(m)	b	Corrente (A)	Voltagem (V)	L (m)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,03	0,15	0,0018	0,0633	0,1530	48,5084	0	1725,9537
		0,0018	0,0467	0,1530	48,5084	15	1255,3001
		0,0017	0,0500	0,1530	48,5084	30	1401,9764
		0,0017	0,0533	0,1530	48,5084	45	1546,0839
		0,0017	0,0533	0,1530	48,5084	60	1561,6380
		0,0017	0,0500	0,1530	48,5084	75	1410,1274
		0,0018	0,0317	0,1530	48,5084	90	856,5606
		0,0017	0,0300	0,1530	48,5084	105	866,2211
		0,0017	0,0367	0,1530	48,5084	120	1028,1160
		0,0018	0,0533	0,1530	48,5084	135	1434,6287
		0,0018	0,0467	0,1530	48,5084	150	1274,1414
		0,0018	0,0533	0,1530	48,5084	165	1406,0401
		0,0018	0,0633	0,1530	48,5084	180	1725,9537
		0,0018	0,0467	0,1530	48,5084	195	1255,3001
		0,0017	0,0500	0,1530	48,5084	210	1401,9764
		0,0017	0,0533	0,1530	48,5084	225	1546,0839
		0,0017	0,0533	0,1530	48,5084	240	1561,6380
		0,0017	0,0500	0,1530	48,5084	255	1410,1274
		0,0018	0,0100	0,1530	48,5084	270	856,5606
		0,0017	0,0300	0,1530	48,5084	285	866,2211
		0,0017	0,0367	0,1530	48,5084	300	1028,1160
		0,0018	0,0533	0,1530	48,5084	315	1434,6287
		0,0018	0,0467	0,1530	48,5084	330	1274,1414
		0,0018	0,0533	0,1530	48,5084	345	1406,0401
		0,0018	0,0633	0,1530	48,5084	360	1725,9537

ANEXO XX: Dados do levantamento azimuthal, Arranjo Dipolo-dipolo Equatorial para espaçamento de 4 cm. Etapa 3.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>							
Arranjo Dipolo-Dipolo equatorial - Fase 3							
Espaçamento(m)	b	Corrente (A)	Voltagem (V)	L (m)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,04	0,2	0,0017	0,0500	0,2040	64,6779	0	1898,5671
		0,0017	0,0433	0,2040	64,6779	15	1626,3289
		0,0016	0,0400	0,2040	64,6779	30	1658,4064
		0,0015	0,0433	0,2040	64,6779	45	1928,4680
		0,0016	0,0500	0,2040	64,6779	60	2008,6289
		0,0016	0,0573	0,2040	64,6779	75	2293,7300
		0,0019	0,0633	0,2040	64,6779	90	2178,8638
		0,0018	0,0633	0,2040	64,6779	105	2327,4227
		0,0017	0,0567	0,2040	64,6779	120	2190,2858
		0,0018	0,0500	0,2040	64,6779	135	1830,5052
		0,0018	0,0467	0,2040	64,6779	150	1695,6740
		0,0018	0,0500	0,2040	64,6779	165	1816,7936
		0,0017	0,0500	0,2040	64,6779	180	1898,5671
		0,0017	0,0433	0,2040	64,6779	195	1626,3289
		0,0016	0,0400	0,2040	64,6779	210	1658,4064
		0,0015	0,0433	0,2040	64,6779	225	1928,4680
		0,0016	0,0500	0,2040	64,6779	240	2008,6289
		0,0016	0,0617	0,2040	64,6779	255	2293,7300
		0,0019	0,0633	0,2040	64,6779	270	2178,8638
		0,0018	0,0633	0,2040	64,6779	285	2327,4227
		0,0017	0,0567	0,2040	64,6779	300	2190,2858
		0,0018	0,0500	0,2040	64,6779	315	1830,5052
		0,0018	0,0467	0,2040	64,6779	330	1695,6740
		0,0018	0,0500	0,2040	64,6779	345	1816,7936
		0,0017	0,0500	0,2040	64,6779	360	1898,5671

ANEXO XXI: Dados do levantamento azimuthal, Schlumberger. Etapa 3.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>						
Arranjo Schlumberger - Fase 3						
Espaçamento MN (m)	Espaçamento AB (m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,04	0,2	0,002	1,283	0,753982	0	460,7669
		0,002	1,313	0,753982	15	452,1598
		0,002	1,290	0,753982	30	455,9236
		0,002	1,350	0,753982	45	474,9033
		0,002	1,250	0,753982	60	456,7744
		0,002	1,220	0,753982	75	443,6616
		0,002	1,237	0,753982	90	429,6888
		0,002	1,193	0,753982	105	431,8810
		0,002	1,240	0,753982	120	453,1202
		0,002	1,213	0,753982	135	450,6560
		0,002	1,267	0,753982	150	475,9356
		0,002	1,253	0,753982	165	466,2785
		0,002	1,283	0,753982	180	460,7669
		0,002	1,313	0,753982	195	452,1598
		0,002	1,290	0,753982	210	455,9236
		0,002	1,350	0,753982	225	474,9033
		0,002	1,250	0,753982	240	456,7744
		0,002	1,220	0,753982	255	443,6616
		0,002	1,237	0,753982	270	429,6888
		0,002	1,193	0,753982	285	431,8810
		0,002	1,240	0,753982	300	453,1202
		0,002	1,213	0,753982	315	450,6560
		0,002	1,267	0,753982	330	475,9356
		0,002	1,253	0,753982	345	466,2785
		0,002	1,283	0,753982	360	460,7669

ANEXO XXII: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Wenner para espaçamento de 4 e 6 cm. Etapa 4.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Wenner - Fase 4					
Espacamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute(°)	Fator k	Resistividade aparente (ohm.m)
0,04	0,0042	3,5800	0	0,2512	214,6291
	0,0041	3,5567	15	0,2512	215,6319
	0,0041	3,5267	30	0,2512	214,1576
	0,0042	3,5567	45	0,2512	212,7225
	0,0039	3,3967	60	0,2512	216,3760
	0,0040	3,4167	75	0,2512	213,4992
	0,0040	3,4433	90	0,2512	218,0585
	0,0041	3,5300	105	0,2512	218,0498
	0,0039	3,4000	120	0,2512	218,6212
	0,0042	3,6067	135	0,2512	216,2278
	0,0042	3,7800	150	0,2512	226,0800
	0,0040	3,6567	165	0,2512	230,4067
	0,0042	3,5800	180	0,2512	214,6291
	0,0041	3,5567	195	0,2512	215,6319
	0,0041	3,5267	210	0,2512	214,1576
	0,0042	3,5567	225	0,2512	212,7225
	0,0039	3,3967	240	0,2512	216,3760
	0,0040	3,4167	255	0,2512	213,4992
	0,0040	3,4433	270	0,2512	218,0585
	0,0041	3,5300	285	0,2512	218,0498
	0,0039	3,4000	300	0,2512	218,6212
	0,0042	3,6067	315	0,2512	216,2278
	0,0042	3,7800	330	0,2512	226,0800
	0,0040	3,6567	345	0,2512	230,4067
	0,0042	3,5800	360	0,2512	214,6291
Espacamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute(°)	Fator k	Resistividade aparente (ohm.m)
0,06	0,0037	2,7533	0	0,3768	279,1361
	0,0038	2,8467	15	0,3768	279,3292
	0,0039	2,9900	30	0,3768	291,8736
	0,0037	2,8133	45	0,3768	289,8990
	0,0036	2,7800	60	0,3768	292,3267
	0,0038	2,8800	75	0,3768	287,5929
	0,0036	2,8767	90	0,3768	300,5346
	0,0037	2,9300	105	0,3768	301,9209
	0,0038	2,9067	120	0,3768	288,9794
	0,0037	2,8900	135	0,3768	295,1089
	0,0038	2,9267	150	0,3768	293,8103
	0,0038	3,0567	165	0,3768	301,2429
	0,0037	2,7533	180	0,3768	279,1361
	0,0038	2,8467	195	0,3768	279,3292
	0,0039	2,9900	210	0,3768	291,8736
	0,0037	2,8133	225	0,3768	289,8990
	0,0036	2,7800	240	0,3768	292,3267
	0,0038	2,8800	255	0,3768	287,5929
	0,0036	2,8767	270	0,3768	300,5346
	0,0037	2,9300	285	0,3768	301,9209
	0,0038	2,9067	300	0,3768	288,9794
	0,0037	2,8900	315	0,3768	295,1089
	0,0038	2,9267	330	0,3768	293,8103
	0,0038	3,0567	345	0,3768	301,2429
	0,0037	2,7533	360	0,3768	279,1361

ANEXO XXIII: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Wenner para espaçamento de 8 e 10 cm. Etapa 4.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP Arranjo Wenner - Fase 4 </div> </div>					
Espacamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute(°)	Fator k	Resistividade aparente (ohm.m)
0,08	0,00381	2,54667	0	0,5024	336,1065
	0,00378	2,53333	15	0,5024	337,0026
	0,00392	2,65000	30	0,5024	339,9217
	0,00381	2,65333	45	0,5024	350,1842
	0,00390	2,68333	60	0,5024	345,9641
	0,00384	2,81000	75	0,5024	367,9611
	0,00380	2,69667	90	0,5024	356,8407
	0,00378	2,76333	105	0,5024	366,9512
	0,00383	2,58667	120	0,5024	339,6014
	0,00373	2,55667	135	0,5024	344,6698
	0,00380	2,65333	150	0,5024	350,4911
	0,00387	2,73000	165	0,5024	354,4062
	0,00381	2,54667	180	0,5024	336,1065
	0,00378	2,53333	195	0,5024	337,0026
	0,00392	2,65000	210	0,5024	339,9217
	0,00381	2,65333	225	0,5024	350,1842
	0,00390	2,68333	240	0,5024	345,9641
	0,00384	2,81000	255	0,5024	367,9611
	0,00380	2,69667	270	0,5024	356,8407
	0,00378	2,76333	285	0,5024	366,9512
	0,00383	2,58667	300	0,5024	339,6014
	0,00373	2,55667	315	0,5024	344,6698
	0,00380	2,65333	330	0,5024	350,4911
	0,00387	2,73000	345	0,5024	354,4062
	0,00381	2,54667	360	0,5024	336,1065
Espacamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Azimute(°)	Fator k	Resistividade aparente (ohm.m)
0,1	0,00418	2,47333	0	0,628	371,2956
	0,00389	2,39667	15	0,628	386,5856
	0,00412	2,56000	30	0,628	389,8981
	0,00390	2,41667	45	0,628	389,4782
	0,00396	2,60667	60	0,628	413,7287
	0,00398	2,56333	75	0,628	404,4657
	0,00399	2,58667	90	0,628	407,4649
	0,00408	2,66000	105	0,628	409,0971
	0,00385	2,50667	120	0,628	408,5260
	0,00388	2,51000	135	0,628	406,2577
	0,00401	2,55667	150	0,628	400,7288
	0,00378	2,30000	165	0,628	382,1164
	0,00418	2,47333	180	0,628	371,2956
	0,00389	2,39667	195	0,628	386,5856
	0,00412	2,56000	210	0,628	389,8981
	0,00390	2,41667	225	0,628	389,4782
	0,00396	2,60667	240	0,628	413,7287
	0,00398	2,56333	255	0,628	404,4657
	0,00399	2,58667	270	0,628	407,4649
	0,00408	2,66000	285	0,628	409,0971
	0,00385	2,50667	300	0,628	408,5260
	0,00388	2,51000	315	0,628	406,2577
	0,00401	2,55667	330	0,628	400,7288
	0,00378	2,30000	345	0,628	382,1164
	0,00418	2,47333	360	0,628	371,2956

ANEXO XXIV: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Quadrático para espaçamento de 4 e 6 cm. Etapa 4.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Quadrático - Fase 4					
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,04	0,0035	1,5567	0,428669	0	189,3930
	0,0037	1,6267	0,428669	15	191,0415
	0,0039	1,6333	0,428669	30	178,1576
	0,0037	1,6300	0,428669	45	190,2170
	0,0036	1,6533	0,428669	60	195,2432
	0,0035	1,5200	0,428669	75	185,9877
	0,0035	1,8167	0,428669	90	222,7117
	0,0037	2,0867	0,428669	105	242,1902
	0,0037	2,0233	0,428669	120	233,9946
	0,0039	1,9967	0,428669	135	221,7381
	0,0036	1,9700	0,428669	150	231,7871
	0,0038	1,9067	0,428669	165	217,5676
	0,0035	1,5567	0,428669	180	189,3930
	0,0037	1,6267	0,428669	195	191,0415
	0,0039	1,6333	0,428669	210	178,1576
	0,0037	1,6300	0,428669	225	190,2170
	0,0036	1,6533	0,428669	240	195,2432
	0,0035	1,5200	0,428669	255	185,9877
	0,0035	1,8167	0,428669	270	222,7117
	0,0037	2,0867	0,428669	285	242,1902
	0,0037	2,0233	0,428669	300	233,9946
	0,0039	1,9967	0,428669	315	221,7381
	0,0036	1,9700	0,428669	330	231,7871
	0,0038	1,9067	0,428669	345	217,5676
	0,0035	1,5567	0,428669	360	189,3930
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,06	0,0033	1,2267	0,643003	0	235,6825
	0,0034	1,2000	0,643003	15	230,3296
	0,0033	1,2167	0,643003	30	237,3066
	0,0033	1,2700	0,643003	45	245,7215
	0,0034	1,2433	0,643003	60	236,5289
	0,0035	1,2767	0,643003	75	235,2152
	0,0036	1,5567	0,643003	90	280,6379
	0,0036	1,5700	0,643003	105	281,7252
	0,0035	1,4833	0,643003	120	274,0771
	0,0035	1,4500	0,643003	135	268,6902
	0,0037	1,5467	0,643003	150	270,9842
	0,0035	1,3967	0,643003	165	259,3055
	0,0033	1,2267	0,643003	180	235,6825
	0,0034	1,2000	0,643003	195	230,3296
	0,0033	1,2167	0,643003	210	237,3066
	0,0033	1,2700	0,643003	225	245,7215
	0,0034	1,2433	0,643003	240	236,5289
	0,0035	1,2767	0,643003	255	235,2152
	0,0036	1,5567	0,643003	270	280,6379
	0,0036	1,5700	0,643003	285	281,7252
	0,0035	1,4833	0,643003	300	274,0771
	0,0035	1,4500	0,643003	315	268,6902
	0,0037	1,5467	0,643003	330	270,9842
	0,0035	1,3967	0,643003	345	259,3055
	0,0033	1,2267	0,643003	360	235,6825

ANEXO XXV: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Quadrático para espaçamento de 8 e 10 cm. Etapa 4.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>					
Arranjo Quadrático - Fase 4					
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,08	0,0033	1,1200	0,857338	0	286,9179
	0,0032	1,1500	0,857338	15	303,9893
	0,0029	1,1267	0,857338	30	331,1774
	0,0031	1,1367	0,857338	45	310,0236
	0,0031	1,1100	0,857338	60	303,3937
	0,0032	1,0967	0,857338	75	291,0879
	0,0033	1,1033	0,857338	90	288,6865
	0,0033	1,1333	0,857338	105	293,2544
	0,0033	1,1233	0,857338	120	288,9229
	0,0034	1,1200	0,857338	135	284,9313
	0,0034	1,1100	0,857338	150	276,6410
	0,0033	1,1333	0,857338	165	290,6230
	0,0033	1,1200	0,857338	180	286,9179
	0,0032	1,1500	0,857338	195	303,9893
	0,0029	1,1267	0,857338	210	331,1774
	0,0031	1,1367	0,857338	225	310,0236
	0,0031	1,1100	0,857338	240	303,3937
	0,0032	1,0967	0,857338	255	291,0879
	0,0033	1,1033	0,857338	270	288,6865
	0,0033	1,1333	0,857338	285	293,2544
	0,0033	1,1233	0,857338	300	288,9229
	0,0034	1,1200	0,857338	315	284,9313
	0,0034	1,1100	0,857338	330	276,6410
	0,0033	1,1333	0,857338	345	290,6230
	0,0033	1,1200	0,857338	360	286,9179
Espaçamento(m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,1	0,0034	1,0867	1,071672	0	341,8446
	0,0032	1,0400	1,071672	15	343,2872
	0,0033	0,9900	1,071672	30	322,4789
	0,0034	0,9900	1,071672	45	314,8236
	0,0034	0,9200	1,071672	60	293,1433
	0,0035	0,9800	1,071672	75	301,5040
	0,0031	0,9033	1,071672	90	316,3652
	0,0030	0,8600	1,071672	105	307,2127
	0,0031	0,9467	1,071672	120	326,2111
	0,0031	1,0300	1,071672	135	353,0349
	0,0031	1,0167	1,071672	150	353,3622
	0,0032	1,0900	1,071672	165	360,9030
	0,0034	1,0867	1,071672	180	341,8446
	0,0032	1,0400	1,071672	195	343,2872
	0,0033	0,9900	1,071672	210	322,4789
	0,0034	0,9900	1,071672	225	314,8236
	0,0034	0,9200	1,071672	240	293,1433
	0,0035	0,9800	1,071672	255	301,5040
	0,0031	0,9033	1,071672	270	316,3652
	0,0030	0,8600	1,071672	285	307,2127
	0,0031	0,9467	1,071672	300	326,2111
	0,0031	1,0300	1,071672	315	353,0349
	0,0031	1,0167	1,071672	330	353,3622
	0,0032	1,0900	1,071672	345	360,9030
	0,0034	1,0867	1,071672	360	341,8446

ANEXO XXVI: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Dipolo-dipolo equatorial para espaçamento de 2 e 3 cm. Etapa 4.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>							
Arranjo Dipolo-Dipolo equatorial - Fase 4							
Espaçamento(m)	b	Corrente (A)	Voltagem (V)	L (m)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,02	0,1	0,00518	0,117	0,1020	32,3389	0	728,8231
		0,00480	0,097	0,1020	32,3389	15	651,2699
		0,00466	0,120	0,1020	32,3389	30	832,1667
		0,00467	0,130	0,1020	32,3389	45	900,8699
		0,00476	0,117	0,1020	32,3389	60	793,1761
		0,00483	0,103	0,1020	32,3389	75	691,8610
		0,00479	0,127	0,1020	32,3389	90	855,7653
		0,00530	0,103	0,1020	32,3389	105	630,1110
		0,00540	0,120	0,1020	32,3389	120	718,1994
		0,00521	0,127	0,1020	32,3389	135	785,7283
		0,00515	0,090	0,1020	32,3389	150	565,1462
		0,00524	0,100	0,1020	32,3389	165	617,1550
		0,00518	0,117	0,1020	32,3389	180	728,8231
		0,00480	0,097	0,1020	32,3389	195	651,2699
		0,00466	0,120	0,1020	32,3389	210	832,1667
		0,00467	0,130	0,1020	32,3389	225	900,8699
		0,00476	0,117	0,1020	32,3389	240	793,1761
		0,00483	0,103	0,1020	32,3389	255	691,8610
		0,00479	0,127	0,1020	32,3389	270	855,7653
		0,00530	0,103	0,1020	32,3389	285	630,1110
		0,00540	0,120	0,1020	32,3389	300	718,1994
		0,00521	0,127	0,1020	32,3389	315	785,7283
		0,00515	0,090	0,1020	32,3389	330	565,1462
		0,00524	0,100	0,1020	32,3389	345	617,1550
		0,00518	0,117	0,1020	32,3389	360	728,8231
Espaçamento(m)	b	Corrente (A)	Voltagem (V)	L (m)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,03	0,15	0,00437	0,093	0,1530	48,5084	0	1036,0295
		0,00463	0,063	0,1530	48,5084	15	663,5416
		0,00451	0,087	0,1530	48,5084	30	931,4756
		0,00436	0,057	0,1530	48,5084	45	630,4606
		0,00447	0,087	0,1530	48,5084	60	940,5055
		0,00436	0,100	0,1530	48,5084	75	1111,7276
		0,00428	0,100	0,1530	48,5084	90	1134,2568
		0,00442	0,097	0,1530	48,5084	105	1061,6929
		0,00445	0,100	0,1530	48,5084	120	1089,2601
		0,00449	0,083	0,1530	48,5084	135	899,6362
		0,00452	0,077	0,1530	48,5084	150	822,7823
		0,00449	0,083	0,1530	48,5084	165	900,9729
		0,00437	0,093	0,1530	48,5084	180	1036,0295
		0,00463	0,063	0,1530	48,5084	195	663,5416
		0,00451	0,087	0,1530	48,5084	210	931,4756
		0,00436	0,057	0,1530	48,5084	225	630,4606
		0,00447	0,087	0,1530	48,5084	240	940,5055
		0,00436	0,100	0,1530	48,5084	255	1111,7276
		0,00428	0,100	0,1530	48,5084	270	1134,2568
		0,00442	0,097	0,1530	48,5084	285	1061,6929
		0,00445	0,100	0,1530	48,5084	300	1089,2601
		0,00449	0,083	0,1530	48,5084	315	899,6362
		0,00452	0,077	0,1530	48,5084	330	822,7823
		0,00449	0,083	0,1530	48,5084	345	900,9729
		0,00437	0,093	0,1530	48,5084	360	1036,0295

ANEXO XXVII: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Dipolo-dipolo equatorial para espaçamento de 4 cm. Etapa 4.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>							
Arranjo Dipolo-Dipolo equatorial - Fase 4							
Espaçamento(m)	b	Corrente (A)	Voltagem (V)	L (m)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,04	0,2	0,00415	0,093	0,2040	64,6779	0	1455,7716
		0,00420	0,083	0,2040	64,6779	15	1282,2730
		0,00421	0,073	0,2040	64,6779	30	1127,5061
		0,00405	0,067	0,2040	64,6779	45	1063,7804
		0,00404	0,067	0,2040	64,6779	60	1066,4114
		0,00396	0,150	0,2040	64,6779	75	2449,9186
		0,00422	0,090	0,2040	64,6779	90	1378,2968
		0,00418	0,113	0,2040	64,6779	105	1753,6260
		0,00414	0,080	0,2040	64,6779	120	1249,8136
		0,00407	0,090	0,2040	64,6779	135	1430,2228
		0,00421	0,070	0,2040	64,6779	150	1074,5529
		0,00432	0,080	0,2040	64,6779	165	1196,8145
		0,00415	0,093	0,2040	64,6779	180	1455,7716
		0,00420	0,083	0,2040	64,6779	195	1282,2730
		0,00421	0,073	0,2040	64,6779	210	1127,5061
		0,00405	0,067	0,2040	64,6779	225	1063,7804
		0,00404	0,067	0,2040	64,6779	240	1066,4114
		0,00396	0,150	0,2040	64,6779	255	2449,9186
		0,00422	0,090	0,2040	64,6779	270	1378,2968
		0,00418	0,113	0,2040	64,6779	285	1753,6260
		0,00414	0,080	0,2040	64,6779	300	1249,8136
		0,00407	0,090	0,2040	64,6779	315	1430,2228
		0,00421	0,070	0,2040	64,6779	330	1074,5529
		0,00432	0,080	0,2040	64,6779	345	1196,8145
		0,00415	0,093	0,2040	64,6779	360	1455,7716

ANEXO XXVIII: Dados do levantamento azimutal, Arranjo Schlumberger. Etapa 4.

<div> <div> UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS NÚCLEO DE GEOTECNIA NUGEO / EM / UFOP </div> </div>						
Arranjo Schlumberger - Fase 4						
Espaçamento MN (m)	Espaçamento AB (m)	Corrente (A)	Voltagem (V)	Fator K	Azimute (°)	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,04	0,2	0,004	1,410	0,753982	0	273,2943
		0,004	1,443	0,753982	15	281,2010
		0,004	1,550	0,753982	30	301,2042
		0,004	1,610	0,753982	45	309,1455
		0,004	1,627	0,753982	60	318,2901
		0,004	1,603	0,753982	75	307,0834
		0,004	1,983	0,753982	90	379,2218
		0,004	1,813	0,753982	105	344,9675
		0,004	1,810	0,753982	120	335,8592
		0,004	1,693	0,753982	135	322,4099
		0,004	1,683	0,753982	150	325,4368
		0,004	1,797	0,753982	165	339,5125
		0,004	1,410	0,753982	180	273,2943
		0,004	1,443	0,753982	195	281,2010
		0,004	1,550	0,753982	210	301,2042
		0,004	1,610	0,753982	225	309,1455
		0,004	1,627	0,753982	240	318,2901
		0,004	1,603	0,753982	255	307,0834
		0,004	1,983	0,753982	270	379,2218
		0,004	1,813	0,753982	285	344,9675
		0,004	1,810	0,753982	300	335,8592
		0,004	1,693	0,753982	315	322,4099
		0,004	1,683	0,753982	330	325,4368
		0,004	1,797	0,753982	345	339,5125
		0,004	1,410	0,753982	360	273,2943

ANEXO XXIX: Coeficiente de anisotropia e resistividade média Etapa 1 e 2.

COEFICIENTE DE ANISOTROPIA E RESISTIVIDADE APARENTE MÉDIA							
Etapa 1							
Arranjo	Esp. (cm)	Resistivida de Máxima (ohm.m)	Resistividade mínima (ohm.m)	Resistividad e eixo maior (ohm.m)	Resistividade eixo menor (ohm.m)	Coeficiente de anisotropia	Resistividade média (ohm.m)
Wenner	0,04	860,485	608,637	860,4848	608,6374	1,19	723,687
	0,06	1218,957	910,104	1218,9567	910,1038	1,16	1053,270
	0,08	1489,756	1146,232	1489,7556	1146,2319	1,140	1306,754
	0,1	1808,700	1382,537	1808,7002	1382,5373	1,144	1581,327
Quadrático	0,04	670,688	503,465	660,6695	524,8663	1,12	588,866
	0,06	903,020	678,801	903,0198	689,3665	1,14	788,994
	0,08	1055,739	830,311	1055,7390	830,3110	1,13	936,265
	0,1	1320,845	956,181	1068,0882	917,1845	1,08	989,765
Dipolo-Dipolo Equatorial	0,02	3270,228	1691,259	3270,2280	1761,0304	1,36	2399,786
	0,03	3523,611	2346,300	3523,6113	2504,3609	1,19	2970,588
	0,04	3370,536	1552,268	2732,8670	1552,2684	1,33	2059,646
Schlumberger	0,04	876,978	728,771	876,9782	728,7707	1,10	799,447
COEFICIENTE DE ANISOTROPIA E RESISTIVIDADE APARENTE MÉDIA							
Etapa 2							
Arranjo	Esp. (cm)	Resistivida de Máxima (ohm.m)	Resistividade mínima (ohm.m)	Resistividad e eixo maior (ohm.m)	Resistividade eixo menor (ohm.m)	Coefici ente de anisotr opia	Resistividade média (ohm.m)
Wenner	0,04	348,247	306,711	348,2475	318,5748	1,05	333,081
	0,06	429,857	348,491	405,3987	348,4912	1,08	375,869
	0,08	509,028	456,187	506,8800	448,3139	1,06	476,698
	0,1	598,224	547,674	591,5691	547,6744	1,04	569,199
Quadrático	0,04	417,293	191,333	417,293	266,881	1,25	333,718
	0,06	445,631	337,849	445,631	337,849	1,15	388,015
	0,08	473,440	423,029	467,917	423,029	1,052	444,907
	0,1	547,800	488,406	539,9161	490,016	1,050	514,362
Dipolo-Dipolo Equatorial	0,02	1522,610	580,360	1413,8877	580,3595	1,56	905,849
	0,03	2639,194	1637,652	2257,4843	1755,0771	1,13	1990,492
	0,04	2459,234	1860,341	2416,1266	1860,3409	1,14	2120,099
Schlumberger	0,04	484,038	419,700	476,6343	419,7004	1,07	447,262

ANEXO XXX: Coeficiente de anisotropia e resistividade média Etapas 3 e 4.

COEFICIENTE DE ANISOTROPIA E RESISTIVIDADE APARENTE MÉDIA							
Etapa 3							
Arranjo	Esp. (cm)	Resistividade e Máxima (ohm.m)	Resistividade mínima (ohm.m)	Resistividade eixo maior (ohm.m)	Resistividade eixo menor (ohm.m)	Coeficiente de anisotropia	Resistividade média (ohm.m)
Wenner	0,04	643,794	593,213	643,7940	593,2128	1,04	617,986
	0,06	639,885	600,972	639,8854	621,3191	1,01	630,534
	0,08	609,469	564,926	591,8382	564,9258	1,02	578,225
	0,1	634,542	586,528	634,5417	602,3673	1,03	618,245
Quadrático	0,04	455,298	318,943	453,7740	318,9433	1,19	380,432
	0,06	562,956	454,492	546,8777	454,4924	1,10	498,550
	0,08	849,400	602,841	849,3996	602,8406	1,19	715,578
	0,1	602,178	501,266	602,1778	490,9963	1,11	543,753
Dipolo-Dipolo Equatorial	0,02	1542,108	858,555	1542,1084	1066,1183	1,20	1282,213
	0,03	1725,954	856,561	1725,9537	856,5606	1,42	1215,888
	0,04	1064,656	872,715	976,6790	812,9898	1,10	891,084
Schlumberger	0,04	474,903	429,689	460,7669	429,6888	1,04	444,957

COEFICIENTE DE ANISOTROPIA E RESISTIVIDADE APARENTE MÉDIA							
Etapa 4							
Arranjo	Esp. (cm)	Resistividade e Máxima (ohm.m)	Resistividade mínima (ohm.m)	Resistividade eixo maior (ohm.m)	Resistividade eixo menor (ohm.m)	Coeficiente de anisotropia	Resistividade média (ohm.m)
Wenner	0,04	230,407	212,723	230,4067	213,4992	1,039	221,792
	0,06	301,921	279,136	301,9209	279,3292	1,040	290,405
	0,08	367,961	336,106	366,9512	337,0026	1,043	351,658
	0,1	413,729	371,296	407,4649	371,2956	1,05	388,960
Quadrático	0,04	242,190	178,158	233,9946	178,1576	1,15	204,176
	0,06	281,725	230,330	280,6379	235,6825	1,09	257,180
	0,08	331,177	284,931	331,1774	288,9229	1,07	309,329
	0,1	360,903	293,143	360,9030	301,5040	1,09	329,869
Dipolo-Dipolo Equatorial	0,02	900,870	565,146	900,86995	565,14620	1,26	713,529
	0,03	1134,257	630,461	1061,69289	663,54158	1,26	839,332
	0,04	2449,919	1063,780	2449,91861	1196,81452	1,43	1712,337
Schlumberger	0,04	379,222	273,294	379,22184	273,29433	1,18	321,930

ANEXO XXXI: Dados do levantamento Dipolo-dipolo. Etapa 1.

DIPLO DIPOLO - ETAPA 1												
a (m)	R(m)	profundidade teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,08	0,04	37,38	45,38	41,38	1	0,0031	2,077	0,7540	506,7216	41	38
			41,38	49,38	45,38		0,0027	1,843	0,7540	521,1902	45	38
			45,38	53,38	49,38		0,0028	1,343	0,7540	358,3194	49	38
			37,5	45,5	41,5		0,0037	1,850	0,7540	372,6270	41	50
			41,5	49,5	45,5		0,0033	1,920	0,7540	440,4602	45	50
			45,5	53,5	49,5		0,0031	1,670	0,7540	411,4870	49	50
			37,62	45,62	41,62		0,0038	1,707	0,7540	338,6306	41	62
			41,62	49,62	45,62		0,0037	1,723	0,7540	353,4078	45	62
			45,62	53,62	49,62		0,0033	1,707	0,7540	384,8843	49	62
a (m)	R(m)	profundidade teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,12	0,06	37,38	49,38	45,38	2	0,0033	0,923	3,0159	855,9552	45	38
			41,38	53,38	49,38		0,0027	0,553	3,0159	607,5779	49	38
			45,38	57,38	53,38		0,0029	0,590	3,0159	609,3829	53	38
			37,5	49,5	45,5		0,0038	0,900	3,0159	710,5592	45	50
			41,5	53,5	49,5		0,0032	0,620	3,0159	583,7282	49	50
			45,5	57,5	53,5		0,0029	0,663	3,0159	678,9252	53	50
			37,62	49,62	45,62		0,0039	0,733	3,0159	562,7688	45	62
			41,62	53,62	49,62		0,0034	0,503	3,0159	440,8570	49	62
			45,62	57,62	53,62		0,0033	0,537	3,0159	491,4621	53	62
a (m)	R(m)	profundidade teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,16	0,08	37,38	49,38	49,38	3	0,0033	0,307	7,5398	703,5128	49	38
			41,38	53,38	53,38		0,0030	0,277	7,5398	695,3392	53	38
			37,5	49,5	49,5		0,0039	0,363	7,5398	710,9348	49	50
			41,5	53,5	53,5		0,0033	0,330	7,5398	753,9822	53	50
			37,62	49,62	49,62		0,0040	0,283	7,5398	537,2044	49	62
			41,62	53,62	53,62		0,0036	0,270	7,5398	566,0108	53	62
a (m)	R(m)	profundidade teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,2	0,1	37,38	57,38	53,38	4	0,0034	0,180	15,0796	807,8381	53	38
			37,5	57,5	53,5		0,0039	0,217	15,0796	831,3629	53	50
			37,62	57,62	53,62		0,0040	0,163	15,0796	611,6743	53	62

ANEXO XXXII: Dados do levantamento Dipolo-dipolo. Etapa 2.

DIPLO DIPOLO - ETAPA 2												
a (m)	R(m)	profundidade teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,08	0,04	37,38	45,38	41,38	1	0,00166	1,0567	0,7540	478,9827	41	38
			41,38	49,38	45,38		0,00138	0,7500	0,7540	408,7856	45	38
			45,38	53,38	49,38		0,00145	0,8067	0,7540	418,4947	49	38
			37,5	45,5	41,5		0,00185	1,4733	0,7540	600,4687	41	50
			41,5	49,5	45,5		0,00163	1,1300	0,7540	523,7704	45	50
			45,5	53,5	49,5		0,00187	1,2433	0,7540	500,4188	49	50
			37,62	45,62	41,62		0,00203	1,2233	0,7540	455,1176	41	62
			41,62	49,62	45,62		0,00176	1,0233	0,7540	438,3950	45	62
			45,62	53,62	49,62		0,00172	1,0467	0,7540	459,7096	49	62
a (m)	R(m)	profundidade teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,12	0,06	37,38	49,38	45,38	2	0,00170	0,2200	3,0159	390,2967	45	38
			41,38	53,38	49,38		0,00130	0,1700	3,0159	395,4046	49	38
			45,38	57,38	53,38		0,00161	0,1933	3,0159	362,9126	53	38
			37,5	49,5	45,5		0,00190	0,3200	3,0159	507,9459	45	50
			41,5	53,5	49,5		0,00175	0,2700	3,0159	466,2028	49	50
			45,5	57,5	53,5		0,00195	0,3033	3,0159	469,9478	53	50
			37,62	49,62	45,62		0,00206	0,3033	3,0159	444,0931	45	62
			41,62	53,62	49,62		0,00175	0,2467	3,0159	425,1024	49	62
			45,62	57,62	53,62		0,00185	0,2767	3,0159	451,0308	53	62
a (m)	R(m)	profundidade teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,16	0,08	37,38	49,38	49,38	3	0,00174	0,0733	7,5398	317,7703	49	38
			41,38	53,38	53,38		0,00139	0,0567	7,5398	308,1177	53	38
			37,5	49,5	49,5		0,00198	0,1233	7,5398	470,4442	49	50
			41,5	53,5	53,5		0,00191	0,1000	7,5398	395,4452	53	50
			37,62	49,62	49,62		0,00208	0,1200	7,5398	434,9898	49	62
			41,62	53,62	53,62		0,00184	0,1000	7,5398	409,7730	53	62
a (m)	R(m)	profundidade teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,2	0,1	37,38	57,38	53,38	4	0,00178	0,0267	15,0796	226,3361	53	38
			37,5	57,5	53,5		0,00204	0,0600	15,0796	443,5190	53	50
			37,62	57,62	53,62		0,00213	0,0500	15,0796	353,4292	53	62

ANEXO XXXIII: Dados do levantamento Dipolo-dipolo. Etapa 3.

DIPLOLO DIPOLO ETAPA 3												
a (m)	R(m)	profundidade teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,08	0,04	37,38	45,38	41,38	1	0,0034	0,99	0,75398	218,2580	41	38
			41,38	49,38	45,38		0,0029	1,02	0,75398	267,3448	45	38
			45,38	53,38	49,38		0,0030	0,96	0,75398	239,6765	49	38
			37,5	45,5	41,5		0,0032	1,19	0,75398	283,4400	41	50
			41,5	49,5	45,5		0,0029	0,96	0,75398	247,0385	45	50
			45,5	53,5	49,5		0,0030	0,98	0,75398	243,8868	49	50
			37,62	45,62	41,62		0,0033	1,03	0,75398	239,2369	41	62
			41,62	49,62	45,62		0,0028	0,95	0,75398	253,7012	45	62
			45,62	53,62	49,62		0,0028	1,08	0,75398	295,5901	49	62
a (m)	R(m)	profundidade teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,12	0,06	37,38	49,38	45,38	2	0,0035	0,29	3,01593	249,6342	45	38
			41,38	53,38	49,38		0,0029	0,23	3,01593	239,3036	49	38
			45,38	57,38	53,38		0,0031	0,27	3,01593	257,4966	53	38
			37,5	49,5	45,5		0,0032	0,29	3,01593	272,7503	45	50
			41,5	53,5	49,5		0,0030	0,26	3,01593	262,4029	49	50
			45,5	57,5	53,5		0,0031	0,29	3,01593	286,6110	53	50
			37,62	49,62	45,62		0,0033	0,25	3,01593	228,9013	45	62
			41,62	53,62	49,62		0,0029	0,26	3,01593	276,7229	49	62
			45,62	57,62	53,62		0,0029	0,31	3,01593	329,2652	53	62
a (m)	R(m)	profundidade teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,16	0,08	37,38	49,38	45,38	3	0,0035	0,11	7,53982	229,5664	49	38
			41,38	53,38	53,38		0,0029	0,10	7,53982	257,3318	53	38
			37,5	49,5	49,5		0,0032	0,12	7,53982	272,6175	49	50
			41,5	53,5	53,5		0,0030	0,13	7,53982	321,7211	53	50
			37,62	49,62	49,62		0,0032	0,12	7,53982	271,2166	49	62
			41,62	53,62	53,62		0,0029	0,13	7,53982	328,1939	53	62
a (m)	R(m)	profundidade teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,2	0,1	37,38	57,38	53,38	4	0,0033	0,04	15,07964	168,7448	53	38
			37,5	57,5	53,5		0,0032	0,07	15,07964	327,1411	53	50
			37,62	57,62	53,62		0,0032	0,07	15,07964	343,4288	53	62

ANEXO XXXIV: Dados do levantamento Dipolo-dipolo. Etapa 4.

DIPLOLO DIPOLO - ETAPA 4												
a (m)	R(m)	profundidade e teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,08	0,04	37,38	45,38	41,38	1	0,00351	0,96667	0,75398	207,8468	41	38
			41,38	49,38	45,38		0,00340	0,84333	0,75398	187,2007	45	38
			45,38	53,38	49,38		0,00311	0,85000	0,75398	206,0723	49	38
			37,5	45,5	41,5		0,00344	0,91667	0,75398	200,9158	41	50
			41,5	49,5	45,5		0,00318	0,68000	0,75398	161,3981	45	50
			45,5	53,5	49,5		0,00331	0,85333	0,75398	194,3801	49	50
			37,62	45,62	41,62		0,00330	0,88000	0,75398	201,2652	41	62
			41,62	49,62	45,62		0,00316	0,92000	0,75398	219,2825	45	62
			45,62	53,62	49,62		0,00316	0,91000	0,75398	217,1278	49	62
a (m)	R(m)	profundidade e teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,12	0,06	37,38	49,38	45,38	2	0,00353	0,27667	3,01593	236,5993	45	38
			41,38	53,38	49,38		0,00338	0,26333	3,01593	235,2008	49	38
			45,38	57,38	53,38		0,00320	0,30333	3,01593	286,1830	53	38
			37,5	49,5	45,5		0,00346	0,23333	3,01593	203,3863	45	50
			41,5	53,5	49,5		0,00324	0,25333	3,01593	235,8134	49	50
			45,5	57,5	53,5		0,00334	0,30333	3,01593	273,9017	53	50
			37,62	49,62	45,62		0,00332	0,26000	3,01593	235,9503	45	62
			41,62	53,62	49,62		0,00320	0,26000	3,01593	245,0442	49	62
			45,62	57,62	53,62		0,00320	0,29333	3,01593	276,7484	53	62
a (m)	R(m)	profundidade e teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,16	0,08	37,38	49,38	49,38	3	0,00354	0,12333	7,53982	262,6868	49	38
			41,38	53,38	53,38		0,00344	0,12667	7,53982	277,6291	53	38
			37,5	49,5	49,5		0,00348	0,12333	7,53982	267,2159	49	50
			41,5	53,5	53,5		0,00328	0,12333	7,53982	283,2218	53	50
			37,62	49,62	49,62		0,00336	0,11333	7,53982	254,5720	49	62
			41,62	53,62	53,62		0,00326	0,12333	7,53982	285,2489	53	62
a (m)	R(m)	profundidade e teórica (m)	coordenadas AB	coordenadas MN	coordenadas ponto médio	n (m)	corrente (A)	voltagem (V)	Fator K(m)	resistividade aparente (ohm.m)	ponto x	ponto y
0,04	0,2	0,1	37,38	57,38	53,38	4	0,00355	0,07000	15,07964	297,0662	53	38
			37,5	57,5	53,5		0,00349	0,07333	15,07964	317,1627	53	50
			37,62	57,62	53,62		0,00340	0,06333	15,07964	281,1710	53	62

ANEXO XXXV: Análise granulométrica da areia.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA LABORATORIO DE MECÂNICA DE SOLOS
GRANULOMETRIA - NBR 7181		
INTERESSADO : PROCEDÊNCIA : LOCAL :	AMOSTRA : PROFUNDIDADE : DATA :	

Teor de umidade				Massa do solo para ensaio (g)	
Cápsula nº	0	0	0	Massa bruta úmida (g)	959,17
Solo + tara (g)	0,00	0,00	0,00	Tara (g)	0,00
Sólido + tara (g)	0,00	0,00	0,00	Massa do solo úmido (g)	959,17
Tara (g)	0,00	0,00	0,00	Massa do pedregulho seco (g)	33,34
Peso da água (g)	0,00	0,00	0,00	Massa do solo Miúdo úmido (g)	925,83
Peso do sólido (g)	0,00	0,00	0,00	Fator de correção (Fc)	1,00
Umidade (%)	0,00	0,00	0,00	Massa do solo miúdo seco (g)	925,83
Umidade média (%)	0,00			Massa total seca (g)	959,17

AMOST. PARA PENEIR. E SEDIM.		PENEIRAMENTO TOTAL (ABNT NBR 7181)							
Solo miúdo úmido + tara (g)	102,63	Peneira	Peneira	Porcentagem (%)					
Tara (g)	0,00	ABNT	ABNT	Massa retida	Retida	Retida	Que passa		
Massa do solo miúdo úmido (g)	102,63	nº	(mm)	(g)	(%)	Acumulada	Am. Total		
Fator de correção (Fc)	1,00	2"	50,10	0,00	0,00	0,00	100,00		
Massa do solo miúdo seco (g)	102,63	1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00		
PROMEDIO DE DENSIDADE REAL DOS GRÃOS		1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00		
		3/4"	19,10	0,00	0,00	0,00	100,00		
		3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00	100,00		
		4	4,8	0,00	0,00	0,00	100,00		
Picnômetro Nº	III	10	2,0	33,34	3,48	3,48	96,52		
PENEIRAMENTO DO SOLO MIÚDO		Diâmetro	Massa Retida	Porcentagem (%)					
		(mm)	(g)	(%)	Retida	Retida	Que passa	Que passa	
		1.20 (#16)	8,25	8,04	1,46	98,54	95,11		
		0.60 (#30)	15,90	15,49	16,95	83,05	80,16		
		0.42 (#40)	14,55	14,18	31,13	68,87	66,48		
		0.30 (#50)	23,41	22,81	53,94	46,06	44,46		
		0.15 (#100)	18,61	18,13	72,07	27,93	26,96		
		0,075	14,72	14,34	86,42	13,58	13,11		
		HORA:		SEDIMENTAÇÃO (ABNT - 7181)		DENSIMETRO Nº:		PROVETA Nº:	
		Tempo (min)	Ti ° C	u	r(H)	z (cm)	Di (mm)	Rw (H)	r(H)-Rw(H)
0	0,0	0,00	36,0	17	0	1,0	35,0	0,00	
0	0,0	0,00	35,0	17	0,000	1,0	34,0	0,00	
0	0,0	0,00	31,0	17	0,000	1,0	30,0	0,00	
0	0,0	0,00	28,0	17	0,000	1,0	27,0	0,00	
0	0,0	0,00	25,5	16,5	0,000	1,0	24,5	0,00	
0	0,0	0,00	22,0	16,5	0,000	1,0	21,0	0,00	
0	0,0	0,00	19,0	16,5	0,000	1,0	18,0	0,00	
0	0,0	0,00	12,0	16,5	0,000	1,0	11,0	0,00	
0	0,0	0,00	5,0	16,7	0,000	1,0	4,0	0,00	
0	0,0	0,00	4,0	17,0	0,000	1,0	3,0	0,00	
0	0,0	0,00	3,5	18,5	0,000	1,0	2,5	0,00	
0	0,0	0,00	3,0	18,8	0,000	1,0	2,0	0,00	
0	0,0	0,00	3,0	19,5	0,000	1,0	2,0	0,00	

ANEXO XXXVI: Curva granulométrica.