



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**COMPARAÇÃO DE DIVERSOS ARRANJOS DE ELETORRESISTIVIDADE PARA  
CARACTERIZAÇÃO DE DESCONTINUIDADES EM MACIÇOS ROCHOSOS  
FRATURADOS**

**Victor Coelho Pereira**

**MONOGRAFIA n° 319**

Ouro Preto, Junho de 2019



**COMPARAÇÃO DE DIVERSOS ARRANJOS DE  
ELETRORRESISTIVIDADE PARA CARACTERIZAÇÃO DE  
DESCONTINUIDADES EM MACIÇOS ROCHOSOS  
FRATURADOS**

---





## **FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

### **Reitora**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida Marlière de Lima

### **Vice-Reitor**

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

### **Pró-Reitora de Graduação**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Hernani Mota de Lima

### **ESCOLA DE MINAS**

#### *Diretor*

Prof. Dr. Issamu Endo

#### *Vice-Diretor*

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### *Chefe*

Prof. Dr. Marco Antônio Fonseca



**MONOGRAFIA**

**Nº 319**

**COMPARAÇÃO DE DIVERSOS ARRANJOS DE  
ELETORRESISTIVIDADE PARA CARACTERIZAÇÃO DE  
DESCONTINUIDADES EM MACIÇOS ROCHOSOS  
FRATURADOS**

**Victor Coelho Pereira**

*Orientador*

Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2019/1.

**OURO PRETO**

**2019**

---

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>  
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>  
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>  
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita  
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais  
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Victor Coelho Pereira

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

P436c Pereira, Victor Coelho.  
Comparação de diversos arranjos de eletrorresistividade para caracterização de  
descontinuidades em maciços rochosos fraturados [manuscrito] / Victor Coelho  
Pereira. - 2019.

112f.: il.: color; graf; tabs; mapas.

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

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de  
Minas. Departamento de Geologia.

1. Geofísica. 2. Eletrorresistividade. 3. Mecânica de rochas. I. Bacellar, Luis  
de Almeida Prado. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 550.3

Catálogo: [ficha.sisbin@ufop.edu.br](mailto:ficha.sisbin@ufop.edu.br)

## Ficha de Aprovação

---

### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TÍTULO:** Comparação de Diversos Arranjos de Eletroresistividade para Caracterização de Descontinuidades em Maciços Rochosos Fraturados

**AUTOR:** VICTOR COELHO PEREIRA

**ORIENTADOR:** Prof.<sup>a</sup> Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar

**Aprovada em:** 27 de junho de 2019

#### BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar  DEGEO/UFOP

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Sílvia Carvalho Barbosa  DEGEO/UFOP

M.Sc. Luiz Henrique Cardoso  NUGEO/UFOP

Ouro Preto, 27/06/2019



## **Agradecimentos**

---

A Universidade Federal de Ouro Preto, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um belo horizonte.

Ao Professor Bacellar, meu orientador, pelo empenho e tempo dedicado à orientação deste trabalho.

Agradeço à FAPEMIG (Projeto APQ-00932-14) pelo apoio financeiro que viabilizou este projeto.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.



# SUMÁRIO

---

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>ix</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xix</b>
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 APRESENTAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.3 JUSTIFICATIVAS .....	3
2 ELETORRESISTIVIDADE.....	5
2.1 GEOFÍSICA APLICADA .....	5
2.2 MÉTODO DA ELETORRESISTIVIDADE .....	5
2.2.1 Introdução .....	5
2.2.2 O conceito de resistividade aparente .....	8
2.2.3 Configurações dos arranjos de eletrodos .....	9
2.2.3.1 Arranjo Dipolo-dipolo .....	10
2.2.3.2 Arranjo Gradiente.....	11
2.2.3.3 Arranjo Dipolo-dipolo Equatorial .....	12
2.2.3.4 Arranjo Quadrático .....	13
2.2.3.5 Arranjo Wenner.....	14
2.3 PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO .....	15
2.4 LEVANTAMENTOS AZIMUTAIS .....	17
2.5 PARADOXO DE ANISOTROPIA .....	21
2.6 MODELOS FÍSICOS REDUZIDOS DE MACIÇOS ROCHOSOS .....	21
2.6.1 Modelo de Watson e Barker.....	22
2.6.2 Modelo de Moreira .....	26
2.7 INVERSÃO GEOFÍSICA .....	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	31
3.1 INTRODUÇÃO .....	31
3.2 O MACIÇO FRATURADO .....	31
3.2.1 Configuração do maciço rochoso .....	33

3.2.1.1 Etapa 1 .....	33
3.2.1.2 Etapa 2 .....	34
3.3 RESISTIVÍMETRO.....	35
3.4 ENSAIOS DE ELETORRESISTIVIDADE .....	36
3.4.1 Arranjo Dipolo-dipolo .....	36
3.4.2 Arranjo Gradiente.....	37
3.4.3 Levantamentos azimutais.....	39
4 RESULTADOS.....	41
4.1 PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO .....	41
4.2 ARRANJO DIPOLO-DIPOLO .....	42
4.2.1 Etapa 1 .....	42
4.2.2 Etapa 2 .....	44
4.3 ARRANJO GRADIENTE.....	48
4.3.1 Etapa 1 .....	48
4.3.2 Etapa 2 .....	49
4.4 ARRANJO DIPOLO–DIPOLO EQUATORIAL .....	50
4.4.1 Etapa 1 .....	50
4.4.2 Etapa 2 .....	50
4.5 ARRANJO QUADRÁTICO .....	51
4.5.1 Etapa 1 .....	51
4.5.2 Etapa 2 .....	52
4.6 ARRANJO WENNER .....	53
4.6.1 Etapa 1 .....	53
4.6.2 Etapa 2 .....	54
4.7 COMPARAÇÃO ENTRE O ARRANJO DIPOLO-DIPOLO E GRADIENTE.....	54
4.8 SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	56
5 CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

## INDÍCE DE FIGURAS

---

Figura 2.1 Exemplo de disposição dos eletrodos para o método da eletrorresistividade.....	5
Figura 2.2 Intervalo aproximado de valores de resistividade dos tipos comuns de minerais, rochas e materiais de subsuperfície .....	7
Figura 2.3 Subsuperfície anisotrópica e heterogênea com suas respectivas resistividades .....	8
Figura 2.4 Disposição dos eletrodos no arranjo Dipolo-dipolo com o sentido de caminhamento.....	10
Figura 2.5 Exemplo de pseudoseção obtida em levantamento com o arranjo Dipolo-dipolo..	11
Figura 2.6 Disposição dos eletrodos no arranjo Gradiente .....	12
Figura 2.7 Disposição dos eletrodos no arranjo Dipolo-dipolo equatorial .....	12
Figura 2.8 As configurações alfa, beta e gama para o arranjo Quadrático .....	13
Figura 2.9 Disposição dos eletrodos no arranjo Wenner com diferentes espaçamentos entre os eletrodos .....	15
Figura 2.10 Camada fina isotrópica e homogênea que define profundidade de investigação.Princípio da função das características da profundidade de investigação .	16
Figura 2.11 a) Geometria do padrão de fratura NS. Elipse de resistividade aparente esperada .....	18
Figura 2.12 Diagrama estrutural de roseta com resultados de resistividade azimutal, .....	19
Figura 2.13 a) Geometria de duas famílias de fratura. Elipse de resistividade aparente esperada.....	19
Figura 2.14 Diagrama estrutural de roseta com resultados de resistividade azimutal.....	20
Figura 2.15 a) Geometria de duas famílias de fraturas não muito bem desenvolvidas. Elipse de resistividade aparente esperada para esse novo contexto.....	20
Figura 2.16 Croqui do tanque .....	23
Figura 2.17 Vista em planta do croqui do tanque expondo o suporte de eletrodos e seus elementos.....	24

Figura 2.18 Vista de perfil do croqui do tanque com seus componentes.....	24
Figura 2.19 Modelos de anisotropia utilizados por Watson e Barke .....	25
Figura 2.20 Diagramas polares e cartesianos para os três modelos investigados.....	26
Figura 2.21 Representação esquemática da estrutura do tanque e elementos confeccionados por Moreira.....	27
Figura 3.1 Tanque utilizado para a realização dos ensaios .....	31
Figura 3.2 Mármore cristalino branco.....	32
Figura 3.3 Placas alinhadas, numeradas e com a direção do corte definido. Pedacos do mármore após o corte.....	32
Figura 3.4 Início da montagem do maciço rochoso fraturado.....	33
Figura 3.5 Vista, em planta, do maciço rochoso com duas famílias de descontinuidades NS e N60E. ....	34
Figura 3.6 Vista, em planta, do maciço rochoso com duas direções de descontinuidades NS, N60E com fratura central NS de 1 cm preenchida por areia.....	35
Figura 3.7 Resistivímetro Landmapper ERM03.....	36
Figura 3.8 Esquema, em planta, do tanque, maciço rochoso e as linhas em que foi executado o caminhamento elétrico .....	37
Figura 3.9 Esquema, em planta, do tanque, maciço rochoso e as linhas em que foi executado o levantamento para o arranjo gradiente.....	38
Figura 3.10 Disposição inicial dos eletrodos para cada arranjo nos levantamentos azimutais.	39
Figura 4.1 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 1, com profundidade mediana de investigação igual de 1,67 cm. ....	42
Figura 4.2 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 1, com profundidade mediana de investigação igual de 2,78 cm. ....	43
Figura 4.3 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 1, com profundidade mediana de investigação igual de 4,87 cm. ....	43
Figura 4.4 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 1, com profundidade mediana de investigação igual de 5,91 cm. ....	44

Figura 4.5 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 2, com profundidade mediana de investigação igual de 1,67 cm.....	45
Figura 4.6 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 2, com profundidade mediana de investigação igual de 2,78 cm.....	45
Figura 4.7 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 2, com profundidade mediana de investigação igual de 4,87 cm.....	46
Figura 4.8 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 2, com profundidade mediana de investigação igual de 5,91 cm.....	47
Figura 4.9 Mapa de relevo sombreado de resistividade aparente no levantamento Gradiente, etapa 1, com profundidade de investigação igual de 6,48 cm.....	48
Figura 4.10 Mapa de relevo sombreado de resistividade aparente no levantamento Gradiente, etapa 2, com profundidade de investigação igual de 6,48 cm.....	49
Figura 4.11 Diagrama polar de resistividade aparente para o arranjo Dipolo-dipolo equatorial, para a etapa 1, com espaçamento intereletrodo de 3,0 cm e espaçamento entre dipolos de 15,0 cm.....	50
Figura 4.12 Diagrama polar de resistividade aparente para o arranjo Dipolo-dipolo equatorial, para a etapa 2, com espaçamento intereletrodo de 3,0 cm e espaçamento entre dipolos de 15,0 cm.....	51
Figura 4.13 Diagrama polar de resistividade aparente para o arranjo Quadrático, para a etapa 1, com espaçamentos entre eletrodos de 10 cm.....	52
Figura 4.14 Diagrama polar de resistividade aparente para o arranjo Quadrático, para a etapa 2, com espaçamentos entre eletrodos de 10 cm.....	52
Figura 4.15 Diagrama polar de resistividade aparente para o arranjo Wenner, para a etapa 1, com espaçamentos entre eletrodos de 9,0 cm.....	53
Figura 4.16 Diagrama polar de resistividade aparente para o arranjo Wenner, para a etapa 2, com espaçamentos entre eletrodos de 9,0 cm.....	54
Figura 4.17 Mapa de relevo sombreado de resistividade aparente no levantamento Gradiente, etapa 1, com profundidade de investigação igual de 6,48 cm utilizando apenas 6 perfis paralelos .....	55

Figura 4.18 Mapa de relevo sombreado de resistividade aparente no levantamento Gradiente, etapa 2, com profundidade de investigação igual de 6,48 cm utilizando apenas 6 perfis paralelos ..... 55

## ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 2.1 $Z_e/L$ para alguns arranjos.....	16
Tabela 4.1 Profundidade mediana de investigação.....	41
Tabela 4.2 Quadro resumo dos principais resultados para os diferentes arranjos utilizados nessa pesquisa.....	57



## Resumo

---

O emprego de métodos geofísicos elétricos tem-se mostrado uma ferramenta de investigação interessante em diversas áreas, como investigações geotécnicas, prospecção de água subterrânea e investigações geoambientais de áreas contaminadas. Esse método, além de não destrutivo, permite a caracterização de subsuperfície bem como a detecção de discontinuidades geológicas, como fraturas e falhas. O mapeamento tradicional de discontinuidades em maciços rochosos e os métodos geoeletricos são opções viáveis para a caracterização em subsuperfície. Estudos eletrorresistivos foram desenvolvidos, em modelo reduzido em laboratório, com objetivo de identificar, dentre algumas configurações intereletrodos, aquela de melhor resolução, para a detecção de duas famílias de fraturas subverticais em um maciço rochoso. Os arranjos empregados neste estudo foram: Dipolo-dipolo e Gradiente por caminhamento elétrico; arranjo Dipolo-dipolo equatorial, Quadrático e Wenner com a técnica azimutal. Dentre esses arranjos, o Gradiente apresentou melhor resolução na detecção dos dois conjuntos de fraturas permitindo, até estimar o número de fraturas contidas no maciço rochoso.

**Palavras chave:** geofísica, eletrorresistividade, levantamento azimutal, maciço rochoso fraturado, arranjo Gradiente.



### 1.1 APRESENTAÇÃO

O emprego de métodos geofísicos elétricos tem-se revelado uma ferramenta de investigação de significativo interesse na área de Geologia de Engenharia, em especial em investigações geotécnicas, bem como na área de Hidrogeologia, na prospecção de água subterrânea e investigações geoambientais de áreas contaminadas. Nesse contexto, as discontinuidades geológicas, como as fraturas e falhas, são relevantes, pois condicionam o fluxo hídrico subterrâneo e interferem na resistência e deformabilidade de maciços rochosos fraturados. A detecção em subsuperfície das discontinuidades não é simples, mas o método geofísico da eletrorresistividade tem sido empregado com sucesso na sua identificação.

O método da eletrorresistividade consiste em adquirir dados de resistividade em subsuperfície de uma área. Na sua configuração mais simples, esse método utiliza quatro eletrodos que podem se dispor em arranjos lineares e não-colineares (Kearey *et al.* 2009).

Maciços rochosos fraturados são por definição anisotrópicos (Taylor 1984) e sua anisotropia pode ser detectada por diversos arranjos no método da eletrorresistividade. Vários autores já demonstraram a eficiência da eletrorresistividade para detecção de discontinuidades de fraturas (Leonard-Mayer 1984, Taylor & Fleming 1988, Ritzi & Andolsek 1992, Taylor & Jansen 1996, Carlson *et al.*, 1996, Busby 2000).

Uma das técnicas que pode ser utilizada para caracterizar discontinuidades de fraturas são os levantamentos azimutais. Levantamentos eletrorresistivos azimutais são executados rotacionando os eletrodos do arranjo por 180° ou 360° e tomando medidas ao longo de um número suficiente de azimutes para definir qualquer variação da resistividade aparente (Busby 2000).

Levantamentos eletrorresistivos azimutais têm sido conduzidos para determinar a direção principal de anisotropias elétricas (Taylor & Fleming 1988; Lane *et al.* 1995; Watson & Barker 1999; Wishart 2006; Moreira 2016). Diversos autores, como Watson & Barker (2010) e Moreira (2016), também utilizaram esse tipo de levantamento, em modelos reduzidos nas suas investigações. O interessante em se utilizar modelos reduzidos é o controle das condições em que se ocorre o experimento, permitindo avaliar e simular diversas situações (Moreira 2016).

Moreira (2016) investigou características das discontinuidades de um maciço rochoso fraturado em modelo reduzido. O maciço fraturado possuía um conjunto de discontinuidades verticais,

coberto por camada de solo saturado. Um dos objetivos da pesquisa foi investigar entre diferentes arranjos de eletrodos quais permitiam uma melhor caracterização das descontinuidades.

Com a finalidade de abranger condições geológicas diferentes de Moreira (2016), este trabalho orienta-se no sentido de investigar por eletrorresistividade, utilizando diversos arranjos, a detecção de duas famílias de descontinuidades em um modelo reduzido de laboratório simulando um maciço rochoso. O modelo reduzido também foi coberto por uma camada de areia com a finalidade de simular uma camada de solo.

O interessante em utilizar essa cobertura de areia consiste no fato do paradoxo de anisotropia não se aplicar quando o maciço rochoso está coberto por uma camada com considerável espessura (Sauck & Zabik 1992). Esse paradoxo é um fenômeno previsto para arranjos colineares (Taylor & Fleming 1988, Pergavo *et al.* 2001) e deve ser levado em conta na hora de interpretar os resultados em diversos contextos geológicos.

A caracterização e detecção de fraturas é um importante alvo em muitos estudos hidrogeológicos e de engenharia. Os regimes de fluxo e de processos químicos associados com sistemas de fraturas são complexos e têm sua implicação em termos de disposição de água, proteção de água subterrânea, transporte de contaminantes, em estudos geotécnicos (Watson & Barker 2010). Portanto, este trabalho visa contribuir com a disseminação de aplicação de eletrorresistividade em estudos de subsuperfície para detecção de descontinuidades subverticais.

Neste estudo, o levantamento de dados por caminhamento elétrico ocorreu com os arranjos Dipolo-dipolo e Gradiente. Também foi executado aquisição de dados por levantamento azimutais empregando os arranjos Dipolo-dipolo equatorial, Quadrático e o Wenner.

A estrutura do texto deste trabalho é disposta nos seguintes capítulos: Capítulo 1 – Introdução contendo uma breve introdução do tema com apresentação dos métodos geoeletricos, importância da caracterização de descontinuidades em maciços fraturados, objetivos e justificas para a natureza do problema; Capítulo 2 – Revisão bibliográfica do método da eletrorresistividade abordando conceitos, configurações de arranjos, profundidade de investigação, modelos físicos reduzidos em maciços rochosos e inversão geofísica; Capítulo 3 – Descrição dos materiais e métodos utilizados durante todo o trabalho; Capítulo 4 – Apresenta a análise e discussão de todos os resultados alcançados; Capítulo 5 – Aborda a conclusão do trabalho, assim como sugestões para pesquisas futuras.

## **1.2 OBJETIVOS**

Esta pesquisa tem como objetivo a avaliação de diversos arranjos para caracterização por eletrorresistividade de famílias de descontinuidades em maciços rochosos fraturados. Os arranjos empregados para essa investigação foram: Dipolo-dipolo, Dipolo-dipolo equatorial, Gradiente,

Quadrático e Wenner. Além do objetivo principal, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Eleger, dentre os arranjos empregados, aquele mais eficaz na detecção de dois planos de descontinuidades subverticais em maciços rochosos;
- Comparar os resultados obtidos entre os arranjos Dipolo-dipolo e o Gradiente;
- Avaliar a influência de uma descontinuidade com maior abertura nos resultados.

### **1.3 JUSTIFICATIVAS**

Na área de Geologia de Engenharia, investigações geotécnicas em maciços rochosos requerem melhor conhecimento das condições geológico-estruturais, na identificação de fraturamentos, para diagnóstico e viabilização de anteprojetos executivos de obras civis e de drenagem, o que enseja o emprego de métodos indiretos de investigação, de baixo custo/benefício. A anisotropia e heterogeneidade do substrato rochoso, sua geometria e espessura do manto decomposto ou de sedimentos de cobertura, sob diversas granulometrias e grau de saturação, constituem-se fatores que dificultam a interpretação geofísica, e por conseguinte, o seu mapeamento em subsuperfície, com precisão e segurança, mesmo em casos em que tais descontinuidades sejam observadas em afloramentos. Os métodos geofísicos possibilitam detectar essas descontinuidades, antes da execução do projeto. Sucessos obtidos com resoluções de qualidade permitem adaptações e soluções alternativas de contornar possíveis problemas geotécnicos. Justificam-se, portanto, estudos investigatórios sistemáticos com objetivo de determinar qual arranjo apresenta melhor resolução na detecção de sistemas de faturamento subverticais. Os resultados que se pretende chegar visam contribuir na disseminação do emprego de métodos geofísicos elétricos para caracterização de descontinuidades em maciços rochosos.

Pereira, V. C. 2019, Comparação de diversos arranjos de eletrorresistividade para caracterização de descontinuidades em maciços rochosos fraturados.

#### 2.1 GEOFÍSICA APLICADA

A geofísica aplicada tem por objetivo investigações em superfície e subsuperfície, de caráter local ou regional, com aplicação em diversas áreas da geologia. Gravimetria, magnetometria, radiometria, sísmica e os métodos elétricos são utilizados com frequência em estudos geológicos. Em estudos geotécnicos e hidrogeológicos, a caracterização de discontinuidades é de extrema importância (Watson & Barker 2010) e o método da eletrorresistividade tem sido empregado com sucesso para sua detecção.

#### 2.2 MÉTODO DA ELETORRESISTIVIDADE

##### 2.2.1 Introdução

O método da eletrorresistividade, em sua configuração mais simples, utiliza quatro eletrodos (Figura 2.1). Dois eletrodos, denominados A e B, são utilizados para injeção de corrente elétrica, gerada artificialmente, no terreno. A diferença de potencial gerada pelo campo elétrico é medida nos outros dois eletrodos, nomeados M e N. Nesse método, a propriedade física de interesse é a resistividade elétrica.

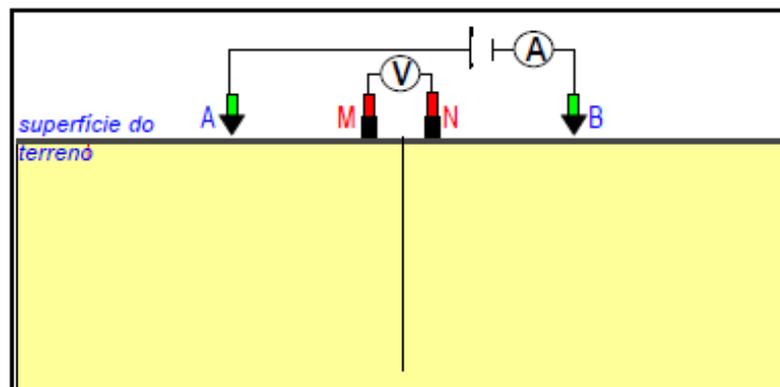


Figura 2.1 Exemplo de disposição dos eletrodos para o método da eletrorresistividade (modificado de Braga 2007).

A resistividade  $\rho$  é uma propriedade do material e é definida como a resistência, em ohms, entre as faces opostas de um cubo unitário do material. Essa propriedade pode ser mensurada pela equação (2.1).

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

Nesse caso  $\delta R$  é a resistência de um cilindro condutor com área de seção transversal  $\delta A$  e comprimento  $\delta L$  (Kearey *et al.* 2009). No SI,  $\rho$  é dado  $\text{ohm} \cdot \text{m}$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ ),  $\delta R$  em  $\Omega$ ,  $\delta A$  em  $\text{m}^2$  e  $\delta L$  em  $\text{m}$ . O inverso de  $\rho$  é definido como condutividade ( $\sigma$ ) e sua unidade no SI é  $\text{siemens}^{-1}$  ( $\text{Sm}^{-1}$ ). A resistividade é uma das propriedades físicas mais variáveis nas rochas (Kearey *et al.* 2009). A Figura 2.2 apresenta valores esperados para os tipos mais comuns de rochas, minerais e materiais de subsuperfície.

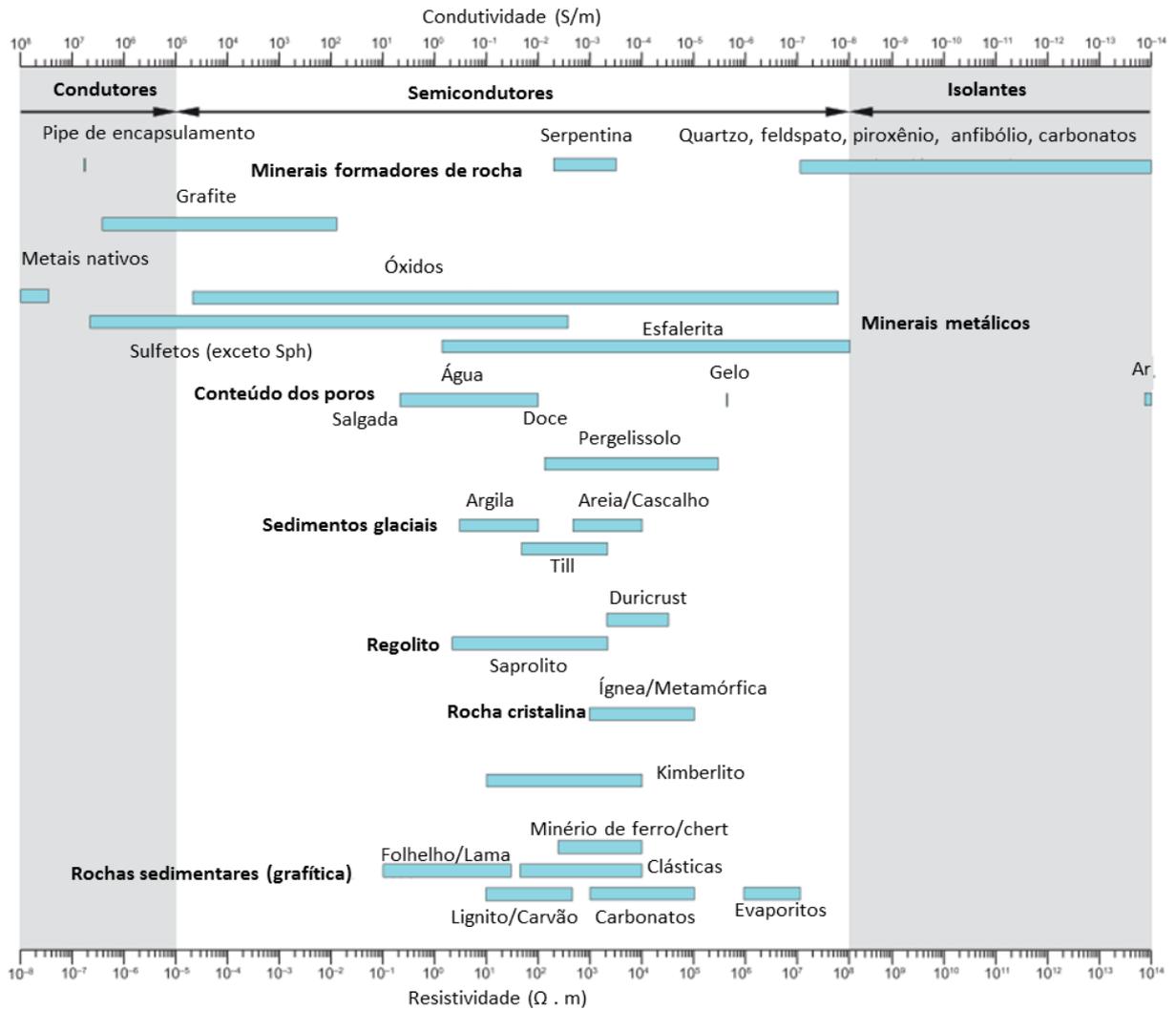


Figura 2.2 Intervalo aproximado de valores de resistividade dos tipos comuns de minerais, rochas e materiais de subsuperfície (modificado de Dentith & Mudge, 2014).

Quando variações de resistividade elétrica são observadas em um levantamento, duas hipóteses podem explicar esse fenômeno. A primeira hipótese sugere que o terreno investigado não é homogêneo e meio isotrópico. A figura 2.3 exemplifica uma investigação em que o terreno é composto por 4 materiais com resistividades elétricas diferentes  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  e  $\rho_4$ . A resistividade aparente obtida não seria a resistividade de um ponto e sim um valor obtido influenciado por todas as resistividades medidas, do tipo de arranjo empregado, a geometria e espaçamento dos eletrodos (Orellana 1972).

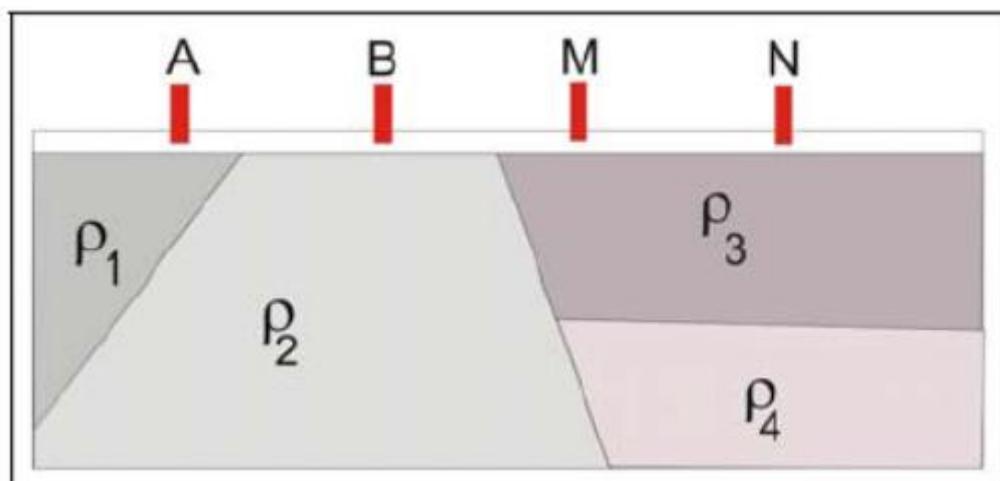


Figura 2.3 Subsuperfície anisotrópica e heterogênea com suas respectivas resistividades (modificado de Orellana 1972).

A segunda hipótese que explica o fenômeno em questão é que ao se tratar de um maciço rochoso fraturado, a variação da eletroresistividade, pode estar relacionada com a anisotropia elétrica (Essein & Ehirim 2009) por que as fraturas fornecem caminhos para a percolação de fluidos (Asare *et al.* 2015). Uma rocha possui anisotropia elétrica quando valores medidos de resistividade variam de acordo com a direção das medidas (Taylor & Fleming 1988, Sherriff 2013).

### 2.2.2 O conceito de resistividade aparente

Supondo uma Terra homogênea e isotrópica, os valores obtidos de eletroresistividade seriam constantes em qualquer ponto de medição e poderíamos denominá-las como resistividade verdadeira (Campos 2004). Os dados adquiridos não apresentariam diferenças, independentemente de qual arranjo e espaçamento entre os eletrodos fossem utilizados durante o levantamento. Porém, a suposição de uma Terra homogênea e isotrópica dificilmente é encontrada na superfície por causa de diferenças composicionais e estruturais presentes em todo o globo. Em uma situação real, o valor da resistividade obtido em um levantamento varia em cada ponto medido, tanto lateralmente como em profundidade. Com isso, os dados obtidos para resistividade não serão homogêneos em todos os pontos. Portanto, a resistividade medida em superfície será um valor “aparente” e não real (Campos 2004). Ao calcular o valor da resistividade, o que será determinado é a resistividade aparente  $\rho_a$  e será

uma função da forma da heterogeneidade (Kearey *et al.* 2009). A equação (2.2) permite o cálculo da resistividade aparente, em  $\Omega \cdot m$ , para qualquer configuração de eletrodo.

$$\rho_a = \frac{K\Delta V}{I} \quad (2.2)$$

Nesse caso:

- $\Delta V$  é a diferença de potencial medida nos eletrodos M e N. No SI sua unidade é Volts (V);
- I é a corrente elétrica injetada artificialmente no terreno pelos eletrodos A e B, dado em A (ampere) no SI.
- O fator K, ou fator geométrico é definido pela equação 2.3, onde AM, BM, AN, BN é o espaçamento entre os respectivos eletrodos. Metro (m) é sua unidade no SI.

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (2.3)$$

### 2.2.3 Configurações dos arranjos de eletrodos

Os métodos eletrorresistivos possuem um grande número de configurações de arranjos de eletrodos. Um grande número de pesquisas envolvendo diversos arranjos está amplamente divulgado nas pesquisas de geofísica aplicada. Os trabalhos de Barker (1989), Pergavo *et al.* (2001) e Bolshakov *et al.* (1998) são exemplos dessa área de pesquisa. Os arranjos podem ser divididos em lineares e não-colineares. Nesse trabalho, os arranjos lineares utilizados são o Dipolo-dipolo, Gradiente e Wenner. Os arranjos não-colineares empregados foram o Dipolo-dipolo equatorial e o Quadrático. A escolha desses arranjos deve-se pelos seguintes motivos:

- com o arranjo Dipolo-dipolo é possível detectar a orientação das discontinuidades em modelo reduzido de laboratório (Moreira 2016);
- o arranjo Gradiente tem sido muito empregado em campo;
- o arranjo Dipolo-dipolo equatorial apresenta alta sensibilidade para anisotropia (Pergavo *et al.* 2001);
- bem sucedidas aplicações do arranjo Quadrático tem sido discutidas e relatadas na literatura (Busby 2000);
- o arranjo Wenner azimutal foi muito bem avaliado por Moreira (2016).

### 2.2.3.1 Arranjo Dipolo-dipolo

Em investigações de campo, o arranjo Dipolo-dipolo é o arranjo mais difundido dentre os diversos arranjos existentes (Gandolfo 2007). Essa configuração de eletrodos possui a característica de permitir o estudo da variação lateral do parâmetro físico investigado em diversos níveis de profundidade. Um caso em que essa característica é importante está relacionado às investigações de plumas de contaminação, que devem ser estudadas tanto lateralmente como em profundidade (Braga 2007).

Ao executar um levantamento por caminhamento utilizando o arranjo Dipolo-dipolo, o par de eletrodos AB e MN não permanecem fixos. O sentido do caminhamento é o sentido em que se deseja fazer a investigação. O espaçamento (a) entre A e B é o mesmo de M e N.

A figura 2.4 apresenta uma disposição inicial de eletrodos utilizando diversos pares de eletrodos para medir o potencial elétrico. Pode-se notar que ao aumentar o espaçamento entre AB e MN por um fator “n.a”, os diferentes eletrodos MN vão adquirir dados para diferentes níveis de profundidade. O valor medido de resistividade elétrica aparente é representado em um ponto da subsuperfície localizado na interseção das retas que partem a 45° do centro dos dipolos, portanto posicionados no ponto médio entre estes (Gandolfo 2007).

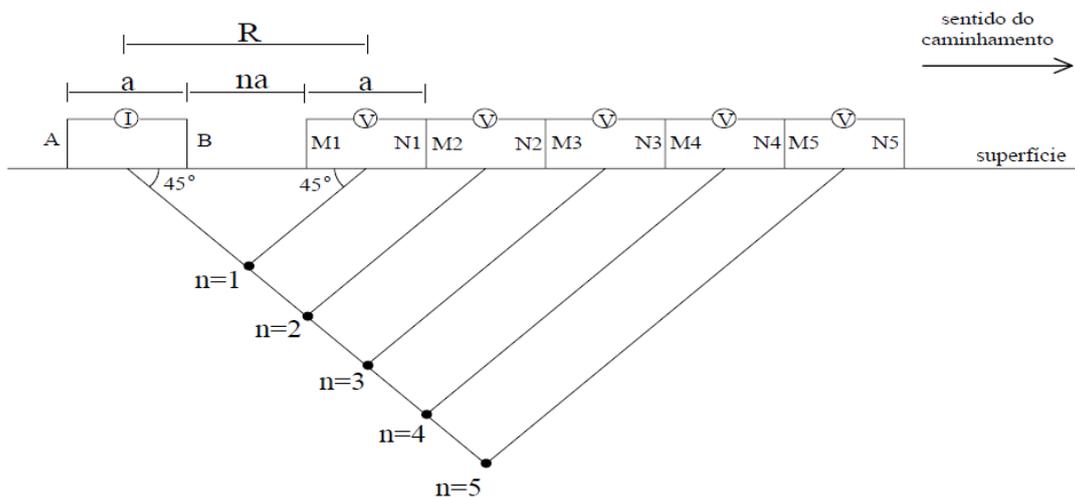


Figura 2.4 Disposição dos eletrodos no arranjo Dipolo-Dipolo com o sentido de caminhamento (Gandolfo 2007)

A equação (2.4) permite calcular o fator geométrico K desse arranjo.

$$K = \pi a n(n + 1)(n + 2) \quad (2.4)$$

O produto desse levantamento é uma seção de resistividade aparente (Figura 2.5).

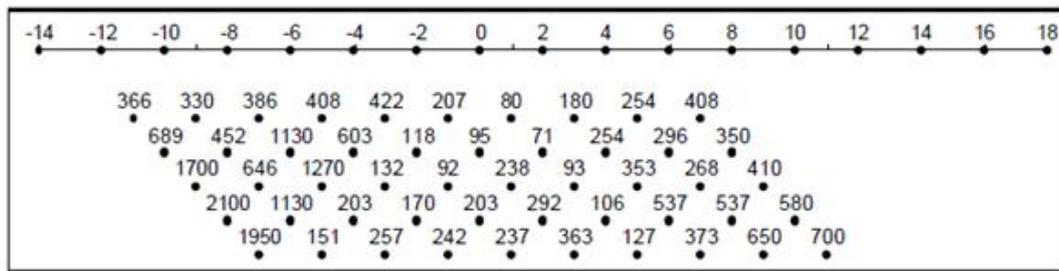


Figura 2.5 Exemplo de pseudoseção obtida em levantamento com o arranjo Dipolo-dipolo. Os dados adquiridos possuem diferentes níveis de profundidade (Braga 2007)

O arranjo Dipolo-dipolo possui restrições quanto à profundidade máxima a ser investigada. Essa restrição é devido à sensibilidade do aparelho utilizado para adquirir dados. Quanto maior for a distância entre MN e AB, menor será a leitura do potencial elétrico medido em MN. Nesse caso, recomenda-se realizar o levantamento em até 6 níveis de profundidades porque o erro dos valores obtidos pelo aparelho estarão na mesma ordem de grandeza do sinal (Gandolfo 2007).

### 2.2.3.2 Arranjo Gradiente

No arranjo Gradiente (Figura 2.6) mantém-se os eletrodos de injeção de corrente AB fixos, e os eletrodos MN são deslocados realizando medidas do potencial elétrico sobre perfis paralelos à linha AB. A profundidade de investigação é determinada por L, distância entre A e B. Esse levantamento permite realizar vários gradientes simultaneamente, superpostos e com diferentes extensões de linha AB. No interior do retângulo central, as estações de medida possuem centro coincidente com o meio de AB e o lado menor não ultrapassa  $AB/2$  ou  $AB/3$  (Gallas *et al.* 2001).

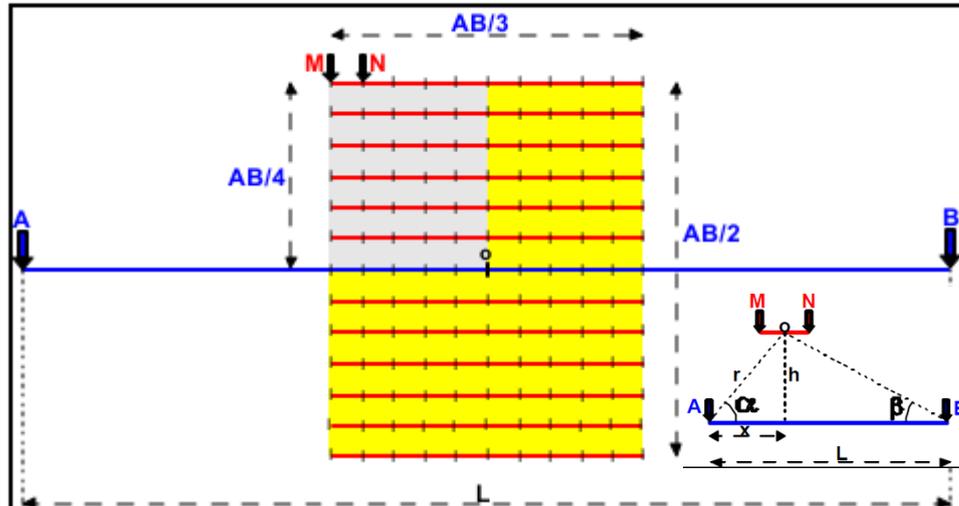


Figura 2.6 Disposição dos eletrodos no arranjo Gradiente (modificado de Braga 2007)

Equação (2.5) determina o fator geométrico K para esse arranjo.

$$K = \frac{2\pi}{MN} \left( \frac{\cos \alpha}{OA^2} + \frac{\cos \beta}{OB^2} \right)^{-1} \quad (2.5)$$

A vantagem desse arranjo é a rapidez na aquisição de dados, pois, como os eletrodos AB permanecem fixos, apenas os eletrodos MN são deslocados ao longo das linhas a serem investigadas (Braga 2007).

### 2.2.3.3 Arranjo Dipolo-dipolo Equatorial

Nesse arranjo o espaçamento “a” entre os eletrodos A e B é o mesmo para os eletrodos M e N. Os eletrodos de injeção de corrente se dispõem paralelamente aos eletrodos de potencial separados por uma distância entre dipolos b (= n.a, onde “n” é um fator multiplicador com valor mínimo igual a 5) (Figura 2.7).

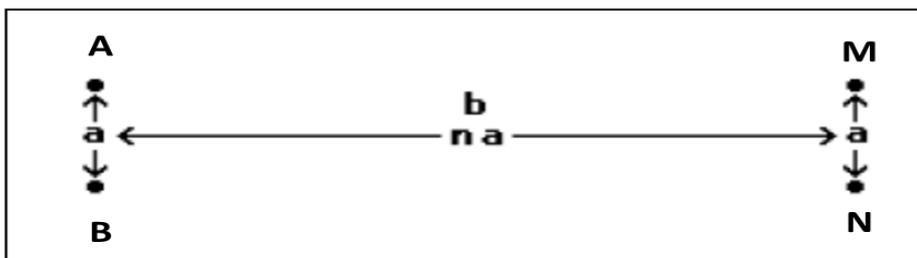


Figura 2.7 Disposição dos eletrodos no arranjo Dipolo-dipolo equatorial (modificado de Loke 1999).

O fator geométrico  $K$  para esse arranjo é dado pela equação 2.6.

$$K = \frac{2\pi bL}{L - b} \quad (2.6)$$

onde  $L = \sqrt{(a^2 + b^2)}$ .

Para essa configuração dos eletrodos, a direção entre os eletrodos A e B foi considerada a direção do azimute do arranjo.

#### 2.2.3.4 Arranjo Quadrático

Essa configuração de arranjo possui essa nomenclatura por dispor os quatro eletrodos, nos vértices de um quadrado com aresta “a”. Para cada quadrado são realizadas três medições. Duas medições, denominadas alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ), são executadas com AB paralelo a MN. A terceira medição, chamada de gama ( $\gamma$ ), possui AB posicionados em diagonal (Figura 2.8) (Lane *et al.* 1995).

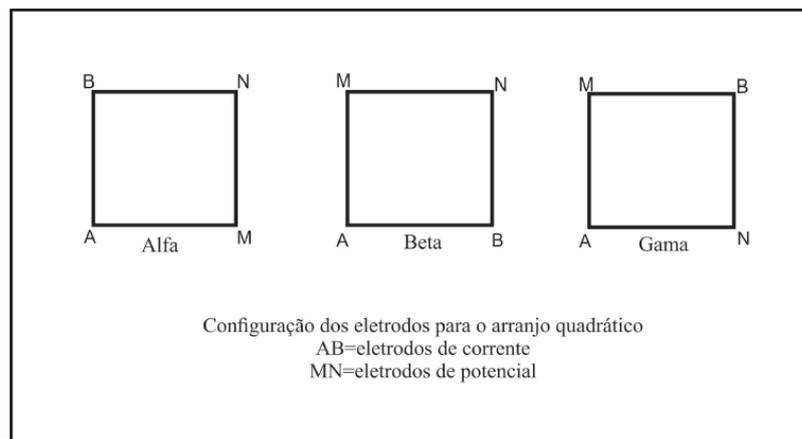


Figura 2.8 As configurações alfa, beta e gama para o arranjo Quadrático (modificado de Lane *et al.* 1995).

O levantamento consiste em rotacionar o quadrado para se obter medidas em vários azimutes. O sinal produzido por  $\alpha$  e  $\beta$  fornece informações sobre a variação direcional da resistividade aparente em subsuperfície. As medidas de  $\gamma$  indicam a precisão dos dados obtidos por  $\alpha$  e  $\beta$  (Lane *et al.* 1995). Quando o meio é isotrópico, a relação entre as resistividades aparentes obtidas nas três configurações (Equação 2.7) é dada por:

$$\rho_{\alpha\alpha} = \rho_{\alpha\beta} \text{ e } \rho_{\alpha\gamma} = 0. \quad (2.7)$$

Entretanto, quando o meio é anisotrópico e homogêneo a relação (Equação 2.8) é dada por:

$$\rho_{\alpha\gamma} = \rho_{\alpha\alpha} - \rho_{\alpha\beta}. \quad (2.8)$$

Nessa configuração de arranjo, o fator geométrico K (Equação 2.9) é definido por (Habberjam & Watkins 1967):

$$K = \frac{2\pi a}{2 - 2^{1/2}}. \quad (2.9)$$

Lane *et al.* (1995) considera o azimute desse arranjo como sendo a linha que conecta os eletrodos de corrente AB.

### 2.2.3.5 Arranjo Wenner

Várias configurações de eletrodos já foram elaboradas (Habberjam 1979) e o arranjo Wenner é o mais simples. Nessa configuração, os eletrodos de potencial e de corrente são mantidos com o mesmo espaçamento “a”. Durante os levantamentos todos os quatro eletrodos precisam ser movidos entre sucessivas leituras (Kearey *et al.* 2009). A distância entre os eletrodos AM, MN e NB pode ser multiplicada por um fator n para aquisição de dados em diferentes níveis de profundidade (Figura 2.9)

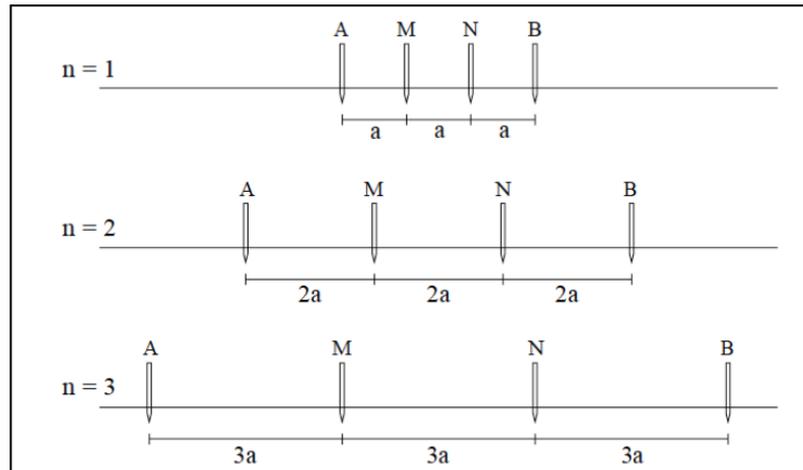


Figura 2.9 Disposição dos eletrodos no arranjo Wenner com diferentes espaçamentos entre os eletrodos (Gandolfo 2007).

O fator K para essa disposição de eletrodos é dado por (Equação 2.10):

$$K_{\alpha} = 2\pi a ; \quad (2.10)$$

### 2.3 PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO

Profundidade de investigação é um conceito físico importante em qualquer método de prospecção geofísica (Roy & Apparao 1971). Uma das possíveis e difundidas definições é de que, em um semiespaço homogêneo e isotrópico, a profundidade de investigação é a profundidade de uma camada horizontal fina e paralela à superfície do terreno que contribui com o máximo de resposta do sinal para determinado arranjo (Roy & Apparao 1971). Nesse caso, a camada fina também é homogênea e isotrópica. A conhecida função características da profundidade de investigação (DIC, em inglês) é comumente apresentada como função da profundidade de uma camada fina (Figura 2.10). Edwards (1977) elaborou um cálculo alternativo para a profundidade de investigação chamado de profundidade mediana de investigação ( $z_e$ ). A mediana é a profundidade que metade da contribuição do sinal vem da parte superior e metade vem da parte inferior.

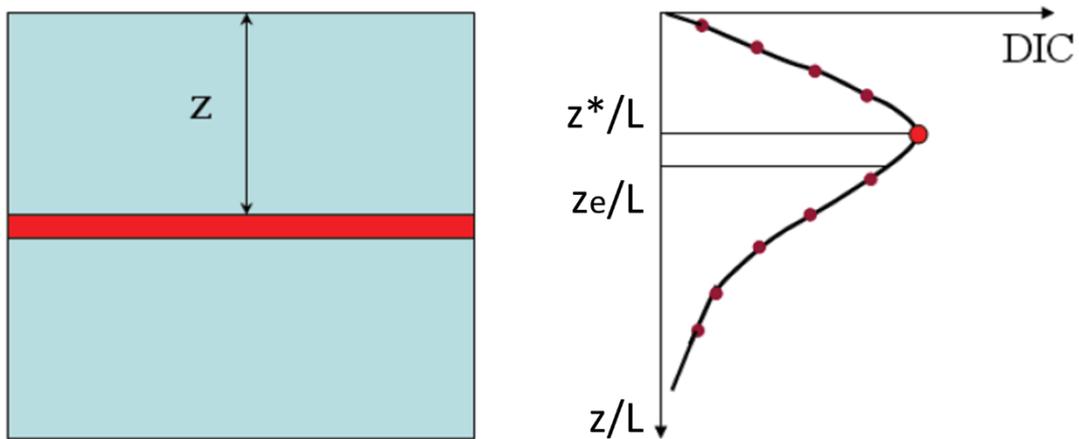


Figura 2.10 (Esquerda) Camada fina isotrópica e homogênea que define profundidade de investigação. (Direita) Princípio da função das características da profundidade de investigação (DIC). L: comprimento do arranjo;  $z^*$ : Profundidade da resposta (Modificado de Szalai *et al.* 2007).

A profundidade mediana de investigação é um conceito que melhor concorda com as experiências de campo do que a profundidade da máxima resposta (Edwards 1977). Uma das formas de se calcular  $z_e$  é multiplicar o termo  $z_e/L$  pelo comprimento total do arranjo (L). Loke (1999) calculou o termo  $z_e/L$  para diversos arranjos (Tabela 2.1).

Tabela 2.1  $z_e/L$  para alguns arranjos (modificado de Loke 1999).

Arranjo	Nível (n)	$z_e/L$
Dipolo-dipolo	1	0,139
	2	0,174
	3	0,192
	4	0,203
	5	0,211
Dipolo-dipolo equatorial		0,319
Wenner		0,173

Com relação ao arranjo Quadrático, o termo  $z_e/L$  é determinado utilizando uma equivalência com os arranjos Wenner ou Schlumberger (Habberjam & Watkins 1967). A equação geral (Equação 2.11) define a relação entre o comprimento do quadrado do arranjo e o tamanho equivalente nos arranjos Wenner ou Schlumberger.

$$A = r \left[ \frac{2(r + s)}{2r + s} \right] \quad (2.11)$$

Nesse caso,  $A$  é o comprimento total equivalente do quadrado no arranjo Quadrático,  $r = AM$  e  $s = MN$ . Como  $AM = MN = s = r = a$  no arranjo Wenner e utilizando esse arranjo para fazer a equivalência com o arranjo Quadrático, a equação 2.11 simplificada se torna (Equação 2.12)

$$A = \frac{4}{3}a \quad (2.12)$$

em que  $a$  é o espaçamento dos eletrodos. Vale ressaltar, que para utilizar o termo  $z_e/L$ , o comprimento equivalente do arranjo Quadrático  $L'$  é 4 vezes o valor  $A$  (Equação 2.13). Logo:

$$L' = \frac{16}{3}a. \quad (2.13)$$

Para o arranjo Gradiente, a profundidade de investigação no centro do arranjo é  $0,135L''$  considerando uma linha finita de eletrodos de comprimento  $L''$  (Bhattacharya & Dutta 1982).

## 2.4 LEVANTAMENTOS AZIMUTAIS

Devido a importância de caracterização de descontinuidades de fraturas para geotecnia e hidrogeologia, diversas técnicas foram desenvolvidas para otimizar os resultados. Essas estruturas geológicas podem promover uma mudança nas propriedades elétricas de um maciço rochoso, passíveis de ser reconhecidas como anisotropias elétricas (Moreira 2016).

Diversos trabalhos executados por levantamentos azimutais têm demonstrado que investigações de anisotropia elétrica em subsuperfície pode ser produto de fraturas com orientação preferencial (Leonard-Mayer 1984, Taylor & Fleming 1988, Ritzi & Andolsek 1992, Taylor & Jansen 1996, Carlson *et al.* 1996, Busby 2000). Em hidrogeologia, Steinich & Marin (1997) concluíram que levantamentos eletrorresistivos azimutais possuem grande potencial para investigações em aquíferos fraturados.

O levantamento eletrorresistivo azimutal utiliza os mesmos equipamentos de um levantamento eletrorresistivo convencional. Essa técnica consiste em fixar um ponto central e realizar medidas da resistividade aparente em função do azimute, com incrementos que podem ser de  $10^\circ$  ou mais (Taylor & Fleming 1998). Diversos arranjos podem ser executados

utilizando essa técnica. Nesse trabalho, os arranjos Dipolo-dipolo equatorial, Quadrático e Wenner foram empregados utilizando essa técnica.

O produto esperado de um levantamento azimutal de um meio com forte anisotropia é uma elipse de resistividade aparente (Watson & Barker 2010). Taylor & Fleming (1988) sugerem uma relação sistemática entre a geometria do sistema de fratura e a elipse de eletrorresistividade aparente obtida no levantamento. Teoricamente, o eixo alongado da elipse de resistividade aparente é coincidente com a direção das descontinuidades, enquanto que a resistividade verdadeira é paralela ao menor eixo da elipse de resistividade (Taylor & Fleming 1988), fenômeno conhecido como o paradoxo de anisotropia. Esses autores definem três tipos de geometrias para as fraturas. A figura 2.11 exemplifica uma subsuperfície teórica investigada com um padrão de fratura NS e a elipse de resistividade aparente esperada para um possível levantamento executado nessa área (Taylor & Fleming 1988). Nesse exemplo, as descontinuidades podem ser consideradas infinitas para a escala do arranjo. Consequentemente, o produto do levantamento é uma elipse muito bem definida em que a orientação da elipse coincide com a direção das fraturas.

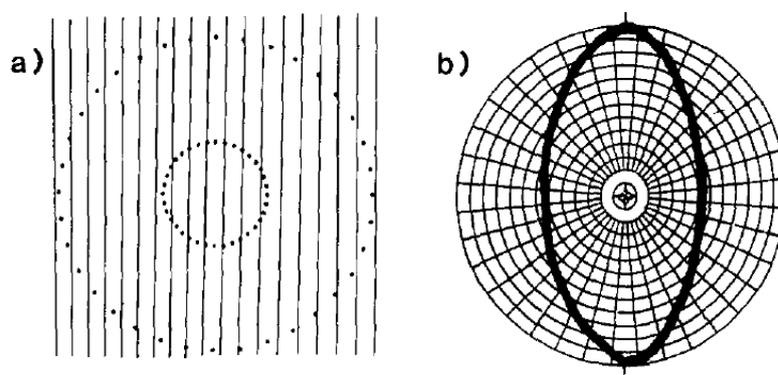


Figura 2.11 a) Geometria do padrão de fratura NS. Os locais em que os eletrodos podem ser posicionados está indicado por pontos b) Elipse de resistividade aparente esperada (Taylor & Fleming 1988).

Taylor & Fleming (1988) expuseram os valores de resistividade aparente obtidos em campo em diagramas estruturais de rosetas em conjunto com resultados de resistividade azimutal. Figura 2.12 apresenta o diagrama de roseta com os dados de resistividade aparente em,  $\Omega \cdot m$ , de um local em que as fraturas individuais possuem uma direção preferencial NW.

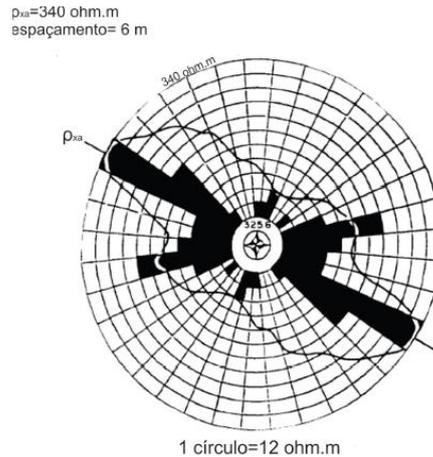


Figura 2.12 Diagrama estrutural de roseta com resultados de resistividade azimutal (linha sólida). Dados obtidos por Taylor & Fleming (1988) para o gabro localizado no Complexo Mellen, Wisconsin, EUA.

Pode-se observar que os picos de resistividade aparente coincidem com a direção principal das fraturas. Esse é mais um exemplo em que o paradoxo de anisotropia deve ser levado em consideração no momento de se interpretar os dados.

Em um contexto em que uma subsuperfície teórica investigada contém duas famílias de fraturas, a elipse de resistividade aparente esperada apresenta dois picos de resistividade aparente (Figura 2.13).

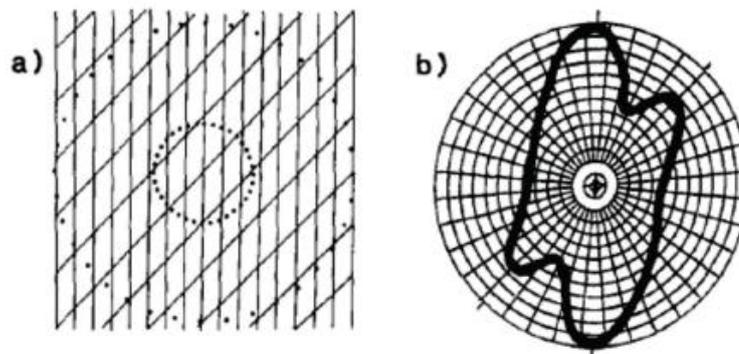


Figura 2.13 a) Geometria de duas famílias de fratura. Os locais em que os eletrodos podem ser posicionados está indicado por pontos b) Elipse de resistividade aparente esperada para esse novo contexto (Taylor & Fleming 1988).

Nesse novo contexto, o diagrama estrutural de rosetas (Fig. 2.14) apresentado por Taylor & Fleming (1988) apresenta dois picos de resistividade aparente em que um lóbulo da elipse possui menor magnitude que o outro. O lóbulo menor geralmente corresponde à família de fraturas que apresenta menor frequência.

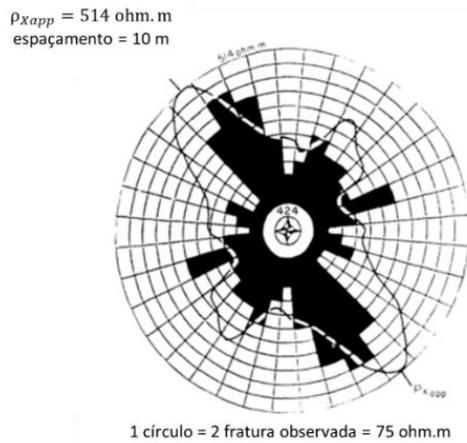


Figura 2.14 Diagrama estrutural de roseta com resultados de resistividade azimutal (linha sólida). Dados obtidos por Taylor & Fleming (1988) em basaltos do Supergrupo Keweenawan, no Parque Estadual Copper Falls, Condado de Ashland, Wisconsin, EUA.

Em um cenário que a geometria das fraturas são pobremente desenvolvidas e que possuem comprimentos menores que os espaçamentos dos eletrodos, um possível levantamento nesse ambiente iria produzir elipses de resistividade aparente (Figura 2.15) que sugerem diferentes interpretações (Taylor & Fleming 1988).

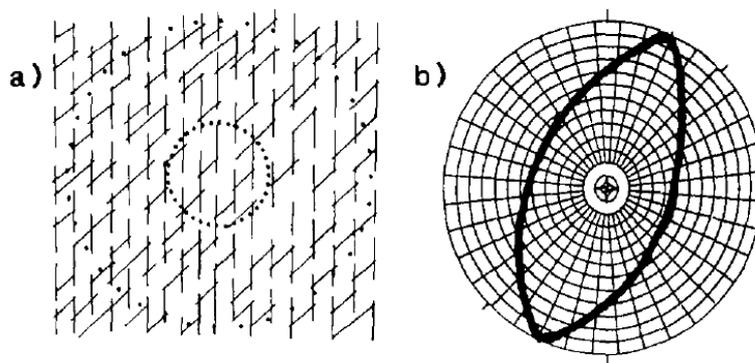


Figura 2.15 a) Geometria de duas famílias de fraturas não muito bem desenvolvidas. Os locais em que os eletrodos podem ser posicionados estão indicados por pontos b) Elipse de resistividade aparente esperada para esse novo contexto (Taylor & Fleming 1988).

Nesse tipo de situação, a corrente não pode atravessar o arranjo de eletrodos ao longo de alguma fratura, em contrapartida deve fluir por um caminho tortuoso que depende do grau de conectividade das descontinuidades. A forma exata da elipse e orientação vai depender da específica geometria das fraturas no ambiente em particular (Taylor & Fleming 1988).

## 2.5 PARADOXO DE ANISOTROPIA

Rochas com fraturas alinhadas ou foliadas geralmente apresentam duas direções de anisotropia. A resistividade medida na perpendicular a estratificação ou fratura ( $\rho_t$ ) é diferente da resistividade medida paralela a estratificação ( $\rho_L$ ) (Watson & Barker 2010). Para um meio homogêneo isotrópico  $\rho_t$  é igual  $\rho_L$ . Quando o meio for homogêneo anisotrópico  $\rho_t$  é maior que  $\rho_L$  (Keller & Frischknecht 1966).

Pesquisas de campo em que fraturas ou camadas estão na vertical e a resistividade é medida diretamente em um terreno anisotrópico, obtém-se que a resistividade aparente medida com direção transversal ao acamamento ( $\rho_{at}$ ) é menor do que a resistividade aparente medida com direção longitudinal ( $\rho_{aL}$ ). Esse comportamento contra intuitivo é conhecido como paradoxo de anisotropia (Watson & Barker, 2010). Luling (2013) apresenta provas analíticas, baseados na Lei de Coulomb e álgebra tensorial, para explicar a ocorrência desse fenômeno.

Esse fenômeno está previsto apenas para arranjos colineares (Taylor & Fleming 1988, Pergavo *et al.* 2001). A ocorrência desse paradoxo se dá apenas quando o levantamento é executado diretamente sobre o maciço ou quando a relação do espaçamento entre os eletrodos ( $a$ ) pela cobertura do solo ( $h$ ) é alta (Moreira 2016). Com o arranjo Wenner, Watson & Barker (2010) caracterizaram o paradoxo da anisotropia para valores  $a/h$  superior ao intervalo de 8 a 24. Portanto, se essas condições estão presentes na investigação deve-se levar em conta o paradoxo de anisotropia ao se interpretar os dados.

## 2.6 MODELOS FÍSICOS REDUZIDOS DE MACIÇOS ROCHOSOS

Modelos reduzidos têm sido aplicados em diversos campos, principalmente na física e engenharias. Alguns exemplos de aplicação são estruturas *off-shore*, hidráulica fluvial, túneis de vento e transmissão de calor. A Engenharia Geotécnica e estudos geomorfológicos utilizam modelos físicos reduzidos para estudar movimentos de massa em encostas (Avelar *et al.* 2004). Com relação a usinas hidroelétricas, estes modelos são úteis e indispensáveis para avaliar interações entre escoamentos, sedimentos e a estrutura da usina (Capello *et al.* 2017). Ao se tratar de barragens, os modelos reduzidos podem ser utilizados para ver propriedades físicas que ocorrem na barragem até o espalhamento de rejeitos em um cenário de ruptura (Lazarim 2015). Uma vantagem em realizar investigações por modelos reduzidos é que pode-

se avaliar a influência de uma única variável de cada vez (Bueno *et al.* 2012). Para utilizar modelos reduzidos em laboratório pode-se utilizar de tanques em que o modelo reduzido será alocado em seu interior.

Uma das vantagens da utilização do tanque é o maior número de observações possíveis de serem realizadas se comparadas com investigações no campo. O modelo a ser estudado previamente possui informações geológicas conhecidas como tamanho, localização espacial, orientação e propriedades elétricas. Consequentemente, quando a técnica experimental apresenta resultados satisfatórios e efeitos de bordas são compensados, é possível assegurar alto grau de precisão utilizando essa abordagem (Watson & Barker 2010).

Goudswaard (1957) conduziu uma série de experimentos de laboratório utilizando tanque em que ele demonstra que os efeitos das bordas do tanque não influenciam o experimento, se forem utilizados apenas 30% do comprimento do tanque.

### **2.6.1 Modelo de Watson e Barker**

Watson & Barker (2010) realizaram levantamentos eletrorresistivo azimutais, com o auxílio de um tanque, para investigar o comportamento eletrorresistivo de modelos de anisotropia combinados com uma interface de mergulho. Esses modelos foram dispostos em três direções distintas e cobertos por espessura variável de água.

O tanque em que foi executado os levantamentos era de vidro com espessura de 1 cm, com dimensões de 100 cm x 100 cm x 50 cm. Com o intuito de evitar efeitos de bordas e seguindo as conclusões de Goudswaard (1957) de utilizar apenas 30% do tanque, os pesquisadores utilizaram espaçamento máximo dos eletrodos de 8 cm. 80 placas de isopor revestidas com filme de PVC, dispostas paralelamente entre si foram utilizadas para construir o maciço anisotrópico. As dimensões das placas eram de 20 cm x 80 cm e 0,5 cm de espessura. Anilhas de plástico de 0,5 cm foram utilizadas para manter as placas separadas (Figura 2.16).

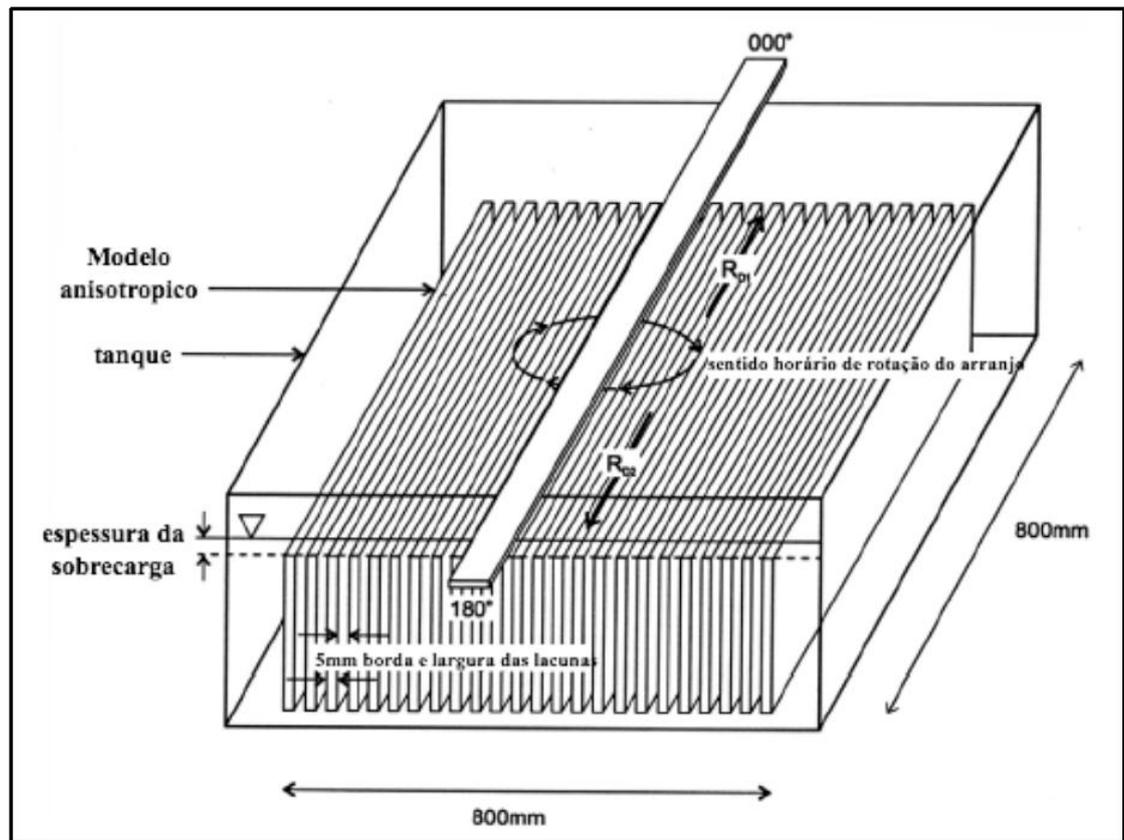


Figura 2.16 Croqui do tanque (Watson & Barker 2010 modificado por Moreira 2016).

Outros elementos foram agregados ao tanque com o objetivo de facilitar o levantamento azimuthal (Figura 2.17). A viga de alumínio, presa a uma pequena borda de vidro, foi responsável por suportar o conjunto de rotação de eletrodos. Esse conjunto, composto por um cilindro de PVC, foi fixado na parte interna da viga de alumínio, com o cilindro conectando dois discos de acrílico. O disco superior foi fixado enquanto o disco inferior ficou livre para girar. Uma haste de acrílico, presa nas extremidades do disco inferior, suporta a plataforma de eletrodos. Essa plataforma, composta por placa de acrílico com espessura de 6 mm, tem a função de girar e comportar os eletrodos. Os eletrodos utilizados foram feitos de aço inoxidável com 6 mm de diâmetro.

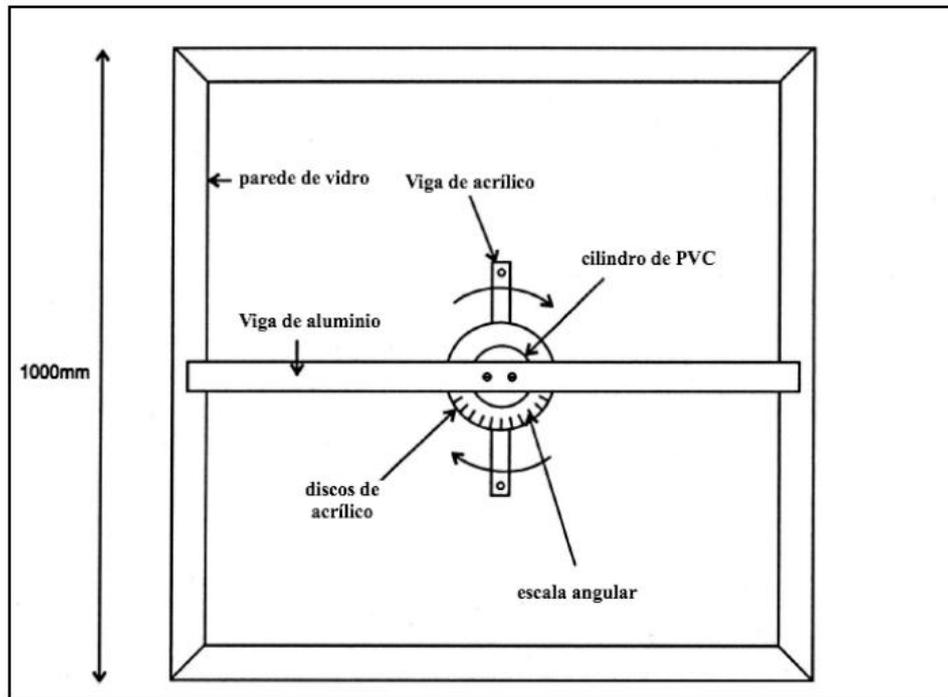


Figura 2.17 Vista em planta do croqui do tanque expondo o suporte de eletrodos e seus elementos (Watson & Barker 2010 modificado por Moreira 2016).

Denominada como caixa de rearranjo de eletrodos, esse aparato experimental permitia a seleção da configuração e espaçamento dos eletrodos (Figura 2.18). Essa caixa permitia a conexão dos eletrodos a um multímetro, que era responsável por aplicar ao modelo uma corrente de 1 mA (Watson & Barker 2010).

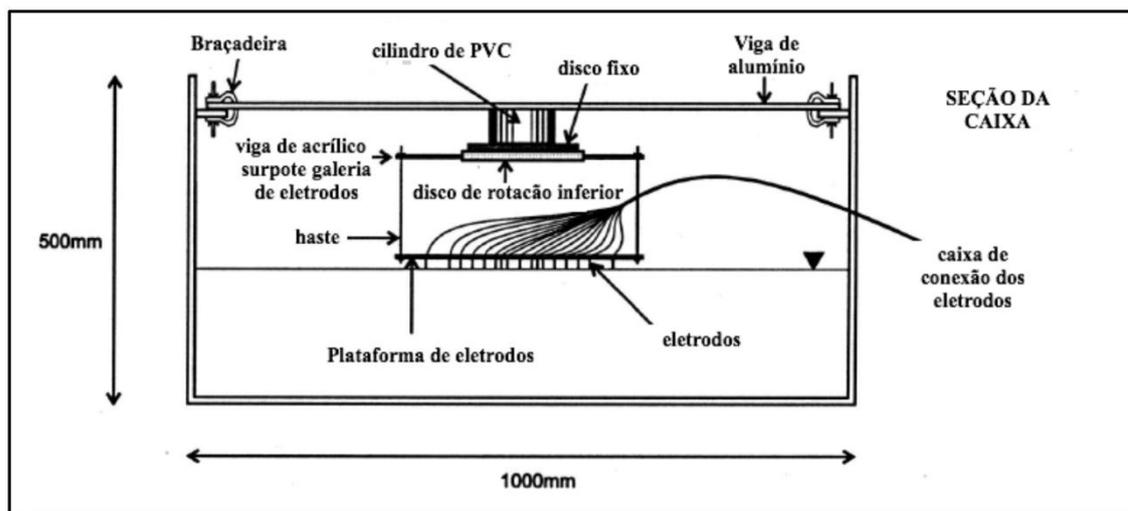


Figura 2.18 Vista de perfil do croqui do tanque com seus componentes. (Watson & Barker 2010 modificado por Moreira 2016).

Para investigar o comportamento eletrorresistivo de modelos de anisotropia combinados com uma interface de mergulho, Watson & Barker (2010) realizaram levantamentos eletrorresistivos utilizando o arranjo Wenner. Para combinar anisotropia com interface inclinada, o modelo foi inclinado em  $8^\circ$ , mantendo as placas paralelas entre si. O modelo foi posicionado em três direções distintas e cobertos por espessura variável de água. As três posições utilizadas foram:

- orientação da camada paralela a interface de mergulho (Figura 2.19 - a);
- orientação da camada e interface de mergulho possui ângulo de  $45^\circ$  entre si (Figura 2.19 - b);
- orientação da camada perpendicular com a interface de mergulho (Figura 2.19 - c).

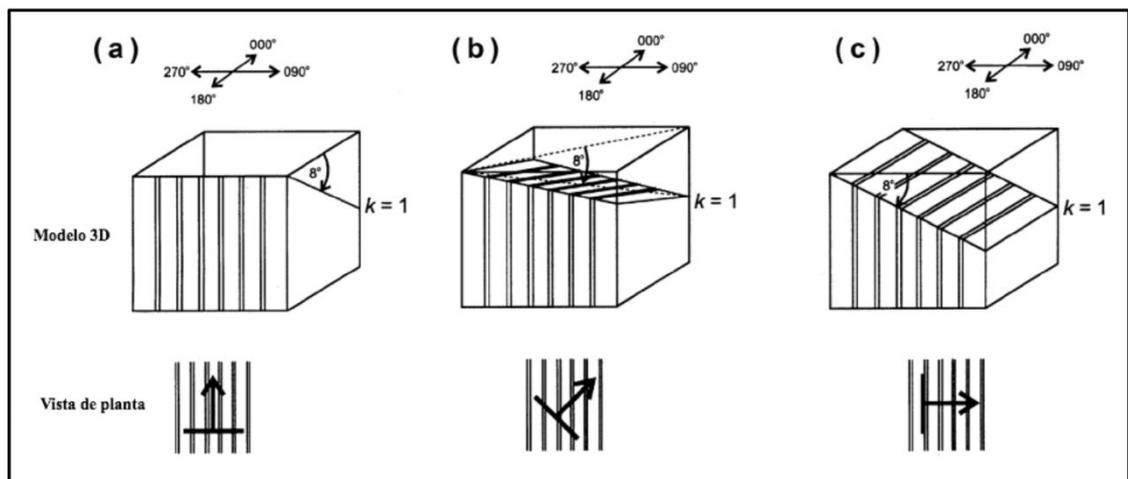


Figura 2.19 Modelos de anisotropia utilizados por Watson e Barker (2010) (Watson & Barker 2010 modificado por Moreira 2016).

Em todas as disposições do modelo, foi utilizado espaçamento de 8 cm e incrementos angulares de  $10^\circ$  com o arranjo Wenner. A partir dos diagramas polares e cartesianos obtidos (Figura 2.20), Watson & Barker (2010) afirmam que: quando a camada é paralela à interface de mergulho, o arranjo Wenner exibe uma pequena anisotropia aparente, eixo da elipse com orientação EW e o paradoxo de anisotropia não é observado; quando a camada possui ângulo de  $45^\circ$  com a interface de mergulho ocorre um leve incremento na anisotropia aparente e o eixo da elipse possui orientação N70E-S20W; no último modelo, camada perpendicular à interface de mergulho possui a mesma anisotropia aparente do que o segundo modelo e o eixo da elipse novamente tem direção EW.

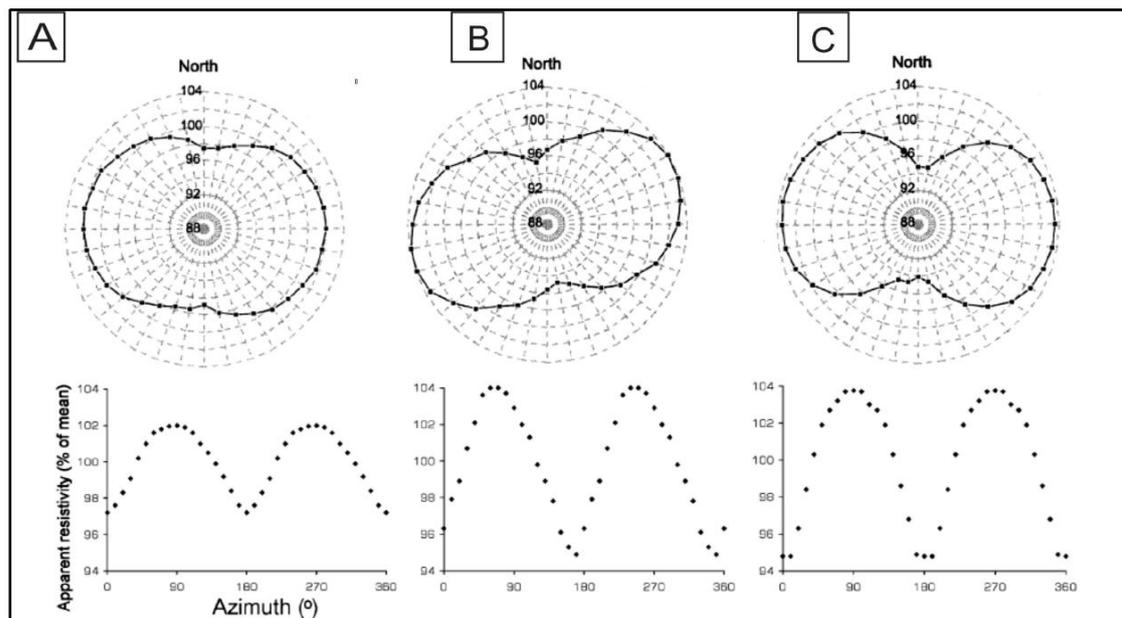


Figura 2.20 Diagramas polares e cartesianos para os três modelos investigados. O ângulo entre a camada e a interface de mergulho em A, B e C é  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  respectivamente (Watson & Barker, 2010).

### 2.6.2 Modelo de Moreira

Moreira (2016) realizou levantamento geoeletricos em modelos reduzidos com a finalidade de caracterizar maciços fraturados. Seu experimento utilizou materiais semelhantes e foi baseado nos trabalhos de Wishart *et al.* (2006) e Watson & Barker (2010). Moreira utilizou um tanque de acrílico transparente com dimensões 100 cm x 100 cm x 50 cm. A espessura das paredes do acrílico foi de 1 cm. Alguns elementos que foram adicionados ao tanque com o objetivo de reforçar as paredes do tanque. Esses elementos são: Cantoneiras de madeira adicionadas nas arestas do tanque, fio de nylon capaz de suportar até 70 kg e cintas de material resistente.

Para a construção do maciço fraturado, foram utilizadas 25 placas de mármore com dimensões de 50 cm x 20 cm x 2 cm. Essas placas foram colocadas no centro do tanque, justapostas e paralelas umas às outras. O resto do tanque foi preenchido com areia média e todo o modelo foi saturado em água potável.

Denominado como suporte de eletrodos, esse aparato contém: viga central de madeira, haste de plástico e plataforma de eletrodos. Um disco de acrílico foi fixado no centro da viga de madeira. Esse disco de acrílico é um transferidor de  $360^\circ$  graduado em  $1^\circ$  (Figura 2.21).

Todas as etapas de construção desses materiais estão explicitadas em detalhes em seu trabalho (Moreira 2016).

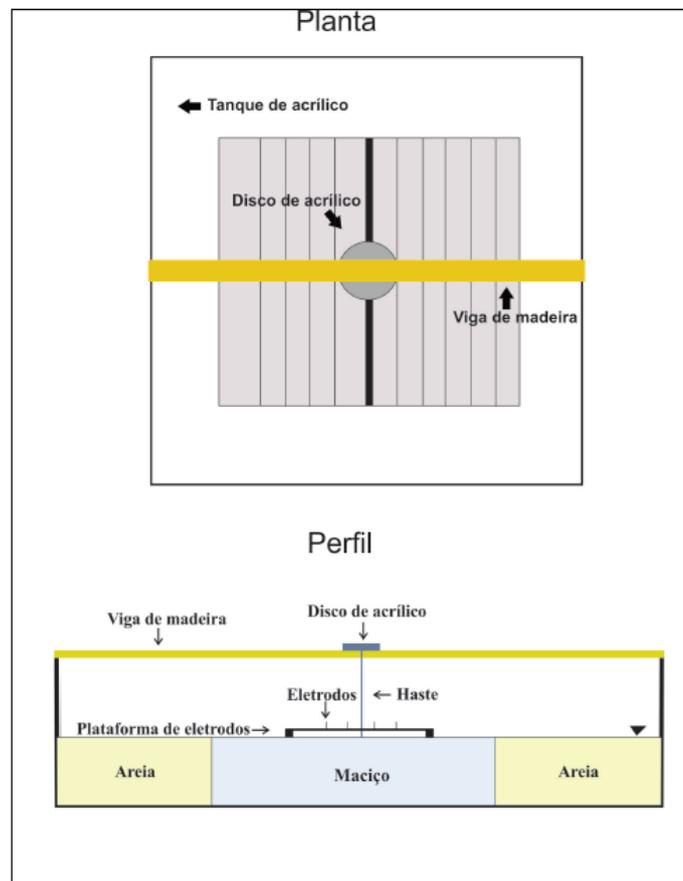


Figura 2.21 Representação esquemática da estrutura do tanque e elementos confeccionados por Moreira (2016).

O objetivo da investigação realizada por Moreira (2016) era de analisar a adequabilidade dos levantamentos geoeletricos azimutais para caracterizar discontinuidades em maciços rochosos coberto por uma camada de solo saturado. Para atingir esse objetivo, avaliou-se a resposta obtida em levantamentos eletrorresistivos por alguns arranjos de eletrodos e com diferentes espaçamentos entre os eletrodos. Os arranjos utilizados foram: Wenner, Schlumberger, Quadrático, Dipolo-dipolo e Dipolo-dipolo equatorial. Também foi investigada a influência da espessura do solo nas resistividades aparentes.

A execução dos levantamentos deu-se em 4 etapas. Na primeira etapa, uma discontinuidade posicionada na parte central do modelo foi simulada. Essa discontinuidade possuía espessura de aproximadamente 0,5 cm, preenchida por areia. O encontro entre as outras placas de mármore reproduziam discontinuidades fechadas, com aberturas de aproximadamente 0,05 cm. Todo o maciço foi coberto por uma camada de areia de 1,8 cm

saturada em água. A etapa 2 e 3 possuíam as mesmas condições de anisotropia do que a etapa 1, porém com espessuras de 5 cm e 8 cm, respectivamente para a camada de areia que cobre o maciço. Para a quarta etapa, distribuí-se descontinuidades de 0,5 cm por todo o modelo. 5 cm de areia cobriram todo o maciço nessa etapa.

Uma conclusão obtida foi de que o arranjo Wenner e Schlumberger apresentaram os melhores resultados em prever a direção da família de descontinuidades. Com relação à influência da espessura de espessura do solo acima do maciço concluiu-se que quanto maior a espessura da camada de solo menor são os valores de resistividade aparente obtidos.

## **2.7 INVERSÃO GEOFÍSICA**

A inversão geofísica pode ser definida como o processo matemático que determina um modelo idealizado de subsuperfície com base em um conjunto finito de dados observados, cuja resposta esteja em concordância com os valores medidos em campo (Gandolfo 2007, Borsatto 2018).

O objetivo da inversão geofísica é a determinação das características do modelo a partir de uma tentativa de ajuste da resposta do modelo com os dados coletados, com um limite de erro pré-estabelecido (Gandolfo 2007).

No processo de inversão dos dados geofísicos, o mesmo dado pode produzir uma variedade de modelos em que valores calculados para a resistividade aparente concordam com os valores observados (Loke 1999). Não apenas esse processo de inversão tenta diminuir a diferença entre os valores medidos e o calculado para resistividade aparente, o método de inversão também procura reduzir outros parâmetros que vão produzir características desejadas no modelo (Loke 1999).

Vale ressaltar que antes da existência de programas capazes de inverter dados de eletrorresistividade, a interpretação dos dados coletados era qualitativa. O profissional responsável pela interpretação valia de sua experiência para determinar o correto posicionamento das anomalias observadas. Entretanto, apesar destas limitações, interpretações puramente qualitativas vinham sendo empregadas com relativo sucesso na aplicação da técnica em mineração e prospecção de água subterrânea em aquíferos fissurados (Gandolfo 2007).

A capacidade de inverter dados eletrorresistivos se desenvolveu de forma abrupta nas últimas décadas. Este fato está diretamente vinculado com a disponibilidade de acessíveis computadores com poder de processamento. O desenvolvimento se deu no início dos anos 90 com computadores pessoais que se tornaram acessíveis e passaram a estar presentes dentro das universidades e empresas. A possibilidade de inversão de dados geofísicos se tornou acessível para pesquisadores que trabalham em investigações de subsuperfície. Atualmente, vários programas de inversão de dados estão disponíveis (Hellman *et al.* 2016). Res2DInv, Aarhusinv e Bert são alguns exemplos *softwares* disponíveis com essa função. Vale ressaltar que o primeiro é um *software* comercial, o segundo está gratuitamente disponível para pesquisadores e estudantes e o terceiro tem seu desenvolvimento e uso pela comunidade científica sem custos (Hellman *et al.* 2016).

Todos os métodos de inversão essencialmente tentam encontrar um modelo que melhor concorda com os dados adquiridos (Loke 1999). Os *softwares* rotineiramente empregados para inversão 2D podem ser classificados em dois principais grupos: os de inversão por polígonos e os de inversão por suavização (Olayinka & Yaramanci 2002).

A inversão por polígonos, conhecida como “true polygon inversion” ou “block inversion” utiliza algoritmos que representam camadas e corpos na forma de polígonos, sendo cada elemento geométrico é representado por um valor de resistividade elétrica constante. Nesse método de inversão é necessária a construção de um modelo inicial pelo intérprete e a inversão é feita a partir desse modelo (Olayinka & Yaramanci 2000)

A inversão por suavização, conhecida por “smooth inversion” utiliza algoritmos baseados em esquema de células (Gandolfo 2007). Nesse método de inversão não é necessário que o usuário entre com um modelo geológico inicial (Loke 1999). Res2DInv é um exemplo de *software* que utiliza esse algoritmo (Gandolfo 2007).

O *software* mais utilizado para inversão de dados de resistividade elétrica é o Res2dInv sendo que o modelo de suavização utilizado, por padrão, é o do método de mínimos quadrados (Schettini 2016). Esse método utiliza como estratégia básica minimizar a soma do quadrados dos erros entre os dados do modelo e os dados observados (Gandolfo 2007). Muitos profissionais que trabalham com imageamento geoeletrico podem não estar familiarizados com a teoria de inversão geofísica. Res2DInv é um *software* desenvolvido para operar de forma automática, robusta, produzindo resultados otimizados e sendo necessário o

Pereira, V. C. 2019, Comparação de diversos arranjos de eletrorresistividade para caracterização de descontinuidades em maciços rochosos fraturados.

mínimo de entrada de dados do usuário. Na maioria das situações, utilizando os parâmetros padrões desse *software* é possível obter resultados razoáveis (Loke 1999).

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

---

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Todo o experimento desse trabalho foi executado dentro de um tanque de acrílico (Figura 3.1) que possui paredes com 1,0 cm de espessura, base quadrada com arestas de 1,00 m e altura de 0,50 m. Também foi necessária a utilização de um suporte de eletrodos para a execução dos levantamentos azimutais. O tanque e o suporte de eletrodos utilizados nesse trabalho foram confeccionados por Moreira (2016) e todas as etapas de construção desses materiais estão explicitadas em detalhes nesse trabalho.



Figura 3.1 Tanque utilizado para a realização dos ensaios. Todo o material foi elaborado e confeccionado por Moreira (2016).

#### 3.2 O MACIÇO FRATURADO

Para construir o maciço fraturado foram utilizadas placas lisas de mármore cristalino branco (Figura 3.2). A escolha do mármore foi motivada por possuir baixíssima porosidade, ou seja, baixa condutividade elétrica, e por possuir densidade suficientemente alta para permanecer fixo no fundo do tanque.



Figura 3.2 Mármore cristalino branco

As fases no processo de montagem do maciço rochoso fraturado são:

- as placas foram alinhadas e linhas diagonais com ângulo de  $60^\circ$  com a vertical foram traçadas para definir onde seria o corte do segundo conjunto de fraturas (Figura 3.3 - A);
- esses pedaços do mármore cortados foram separados de acordo com a sua numeração (Figura 3.3 - B);
- iniciou-se a montagem do maciço rochoso (Figura 3.4) até completar a configuração final com dois padrões de faturamento vertical, uma mais frequente, e outro a 60 graus deste e menos frequente.



Figura 3.3 A) Placas alinhadas, numeradas e com a direção do corte definido. B) Pedacos do mármore após o corte.

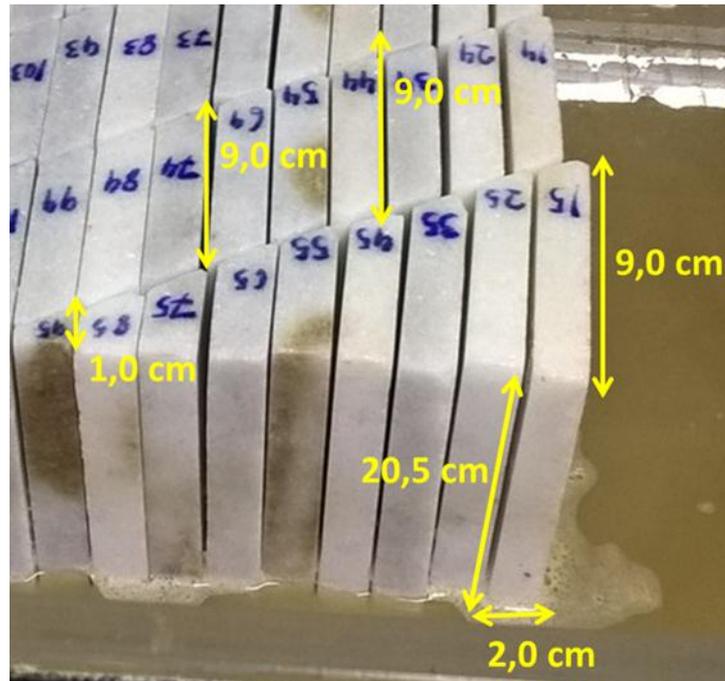


Figura 3.4 Início da montagem do maciço rochoso fraturado. Em destaque as dimensões das placas cortadas.

Todas as placas cortadas possuem espessura de 2,0 cm e altura de 20,5 cm. Pode-se notar que algumas placas possuem comprimento menores que 9,0 cm. Essas placas estão localizadas nas extremidades superior e inferior do maciço.

### 3.2.1 Configuração do maciço rochoso

Nessa pesquisa, foram construídas duas configurações distintas para o maciço rochoso provocando uma divisão desse estudo em duas etapas. Em ambas as etapas, o maciço rochoso foi coberto por uma camada de areia de 2,0 cm. Essa camada de areia tem a finalidade de simular uma camada de solo acima do maciço a ser investigado. Todo o conjunto foi saturado de água para simular um maciço rochoso com cobertura de solo saturada, de baixa resistividade.

#### 3.2.1.1 Etapa 1

Nessa etapa, o maciço rochoso construído possui duas direções de descontinuidades subverticais. Uma família de fraturas com menor espaçamento médio (2,0 cm de espaçamento

entre faturas), de direção com azimute  $0^\circ$  (NS) e outra, com maior espaçamento médio (9,0 cm), com azimute  $60^\circ$  (N60E) (Figura 3.5).

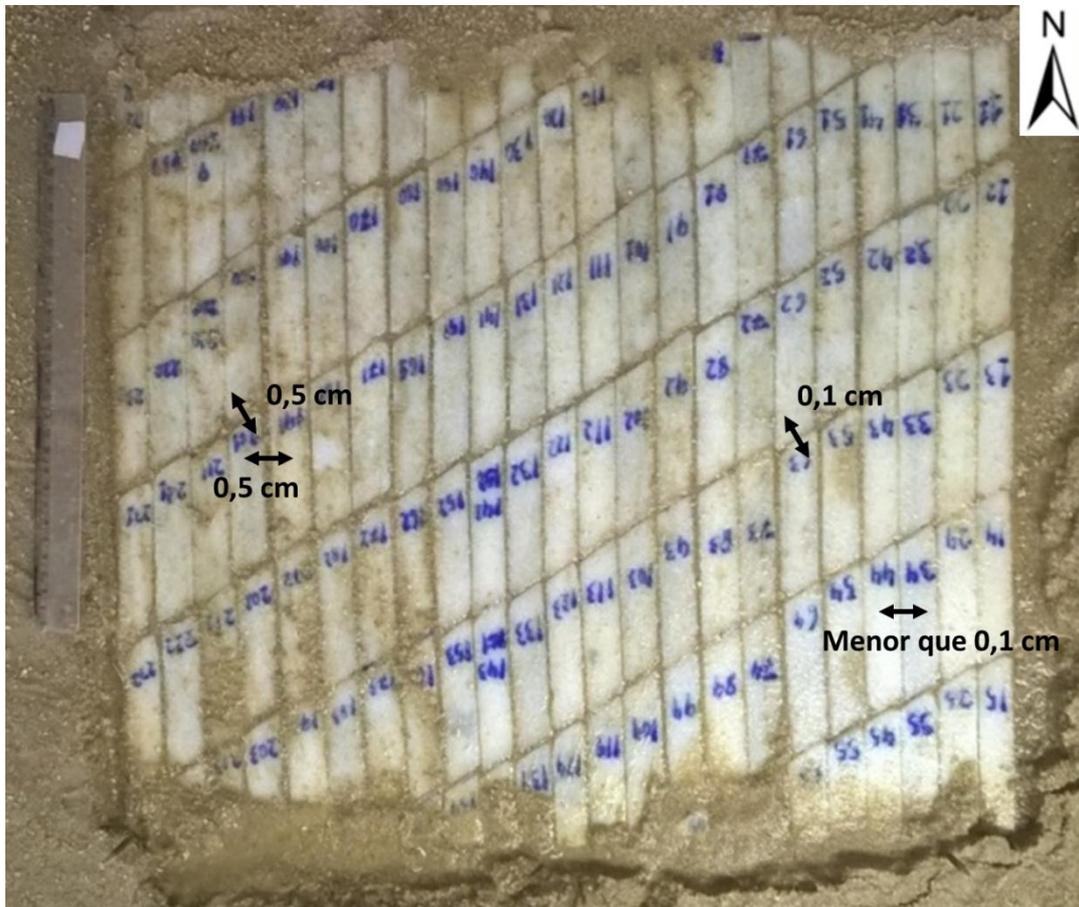


Figura 3.5 Vista, em planta, do maciço rochoso com duas famílias de descontinuidades NS e N60E. A régua possui 30 cm de comprimento.

Ou seja, trata-se de maciço com 22 fraturas de direção NS e 7 fraturas de direção N60E. Devido às irregularidades das placas e do material de preenchimento, a abertura das fraturas não foi regular variando de alguns milímetros e frações de milímetros.

### 3.2.1.2 Etapa 2

Nessa etapa, o maciço rochoso possui as mesmas direções para as famílias de descontinuidades NS e N60E. O que a diferencia da etapa anterior é a fratura central NS com abertura de 1 cm, preenchida por areia (Figura 3.6). Portanto, trata-se da maciço com 21 fraturas de direção NS e 7 fraturas de direção N60E, todas com aberturas inferior a alguns milímetros, com exceção da fratura central NS.

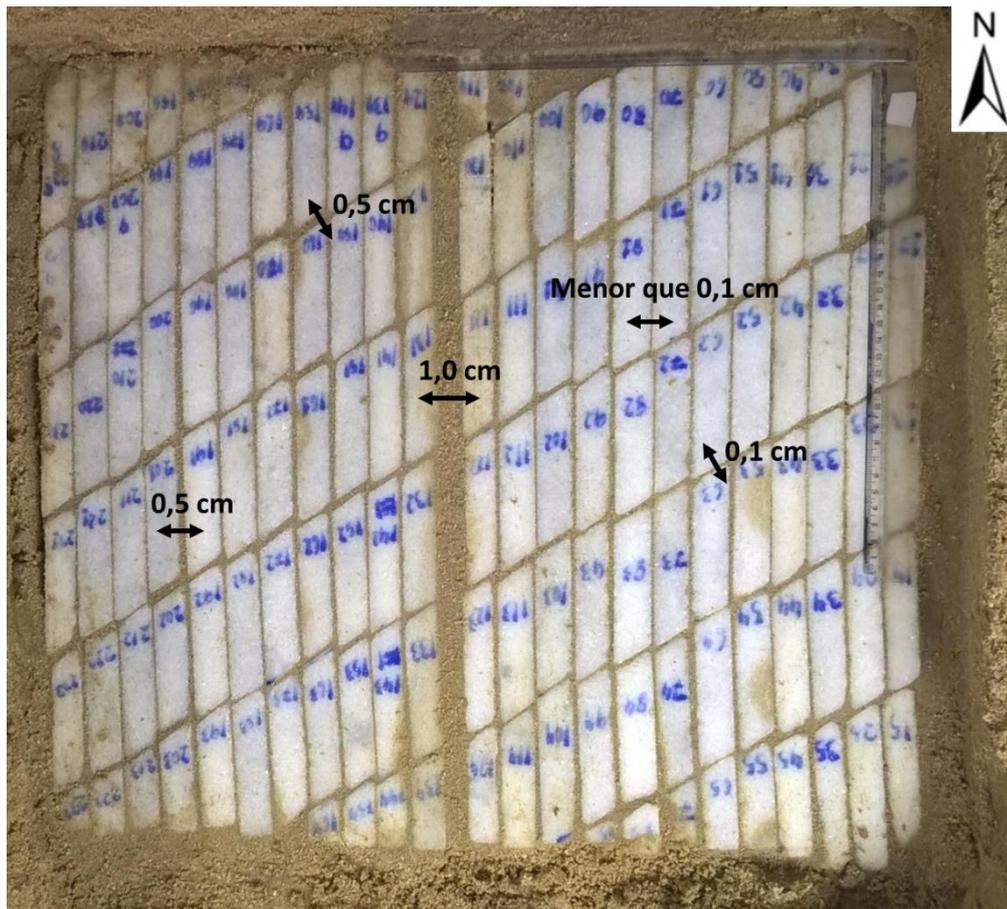


Figura 3.6 Vista, em planta, do maciço rochoso com duas direções de descontinuidades NS, N60E com fratura central NS de 1 cm preenchida por areia. As réguas possuem 30 cm de comprimento.

### 3.3 RESISTIVÍMETRO

Para aquisição dos dados de resistividade foi empregado o resistímetro Landmapper ERM03 (Figura 3.7), produzido pela Research Landviser Enlightening. Esse dispositivo possui alimentação por baterias de 9V e pode executar medidas de resistividade, condutividade e *Self-potential* (SP).



Figura 3.7 Resistivímetro Landmapper ERM03

### 3.4 ENSAIOS DE ELETORRESISTIVIDADE

Em todos os levantamentos executados, para cada disposição dos eletrodos foram obtidas três medidas de resistividade aparente e calculada a média. Os dados apresentados nesse trabalho são da média dessas leituras.

Para levantamentos azimutais a direção da fratura pode ser determinada graficamente ou analiticamente. Para executar a interpretação gráfica, a resistividade aparente azimutal é plotada em diagramas polares (Lane *et al.* 1995). A determinação analítica da direção da fratura não está contemplada nesse trabalho.

#### 3.4.1 Arranjo Dipolo-dipolo

Para o arranjo Dipolo-dipolo, o levantamento foi executado a partir de 3 perfis paralelos espaçados entre si por 12,0 cm (Figura 3.8). O espaçamento entre os eletrodos foi de 4,0 cm e 5 níveis de profundidade foram investigados.

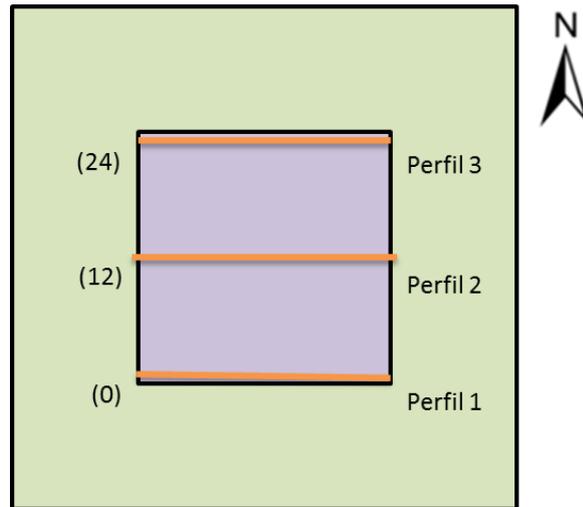


Figura 3.8 Esquema, em planta, do tanque, maciço rochoso e as linhas em que foi executado o caminhamento elétrico. O quadrado maior delimita as extremidades do tanque e o menor as extremidades do maciço rochoso.

Após o processamento dos dados com os *softwares* Res2DInv e Surfer 15, o produto obtido foi dois mapas de contorno. Cada mapa de contorno refere-se à etapa 1 e 2 desse estudo.

### 3.4.2 Arranjo Gradiente

Com relação ao arranjo Gradiente, os eletrodos A e B foram posicionados em uma linha localizada no centro do modelo do maciço rochoso. Os eletrodos MN foram deslocados sobre perfis paralelos à linha AB. Os perfis estavam espaçados por 1,5 cm, totalizando 17 linhas de caminhamento. A figura 3.9 é uma representação esquemática, em planta, das disposições dos eletrodos e os seus limites.

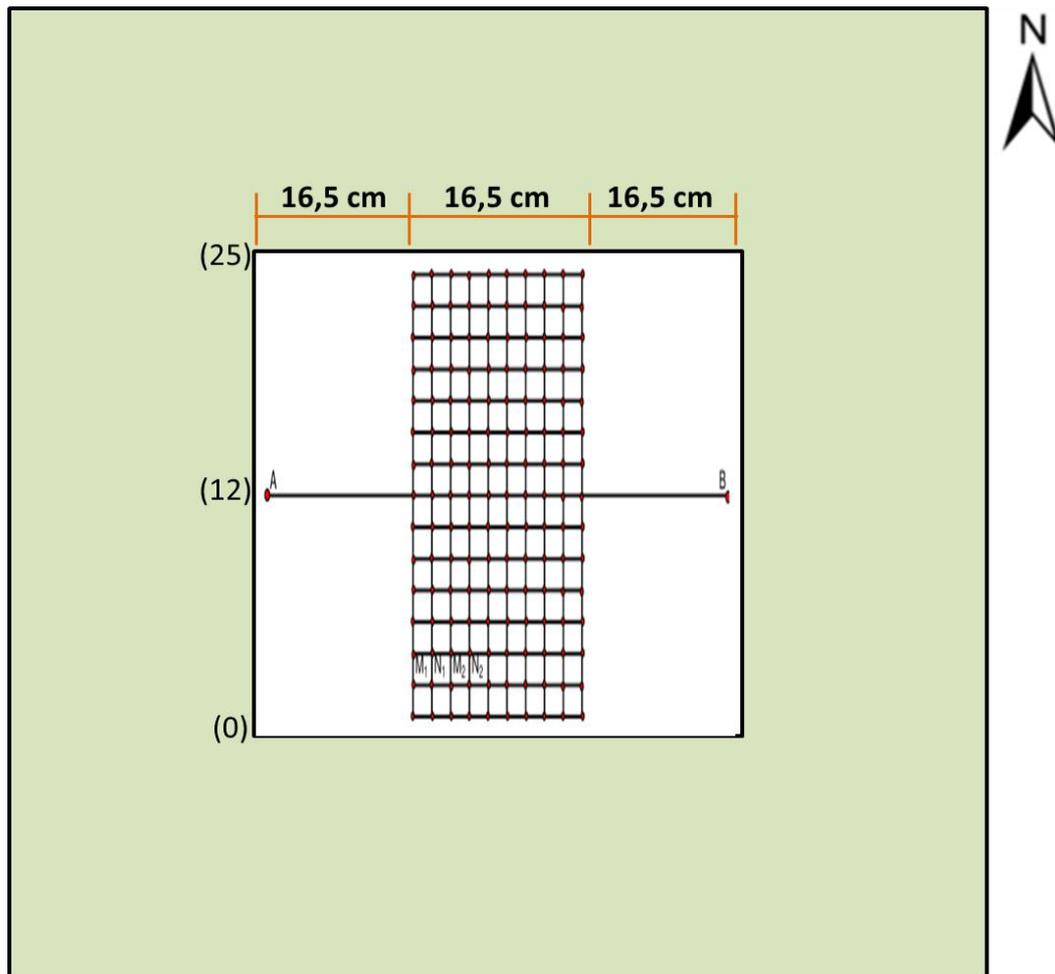


Figura 3.9 Esquema, em planta, do tanque, maciço rochoso e as linhas em que foi executado o levantamento para o arranjo gradiente. O quadrado maior delimita as extremidades do tanque e o menor as extremidades do maciço rochoso. Os pontos vermelhos representam os locais em que foram posicionados os eletrodos M e N.

Neste trabalho foi utilizada a relação  $AB/MN$  igual a 32 e a distância entre os eletrodos de potencial  $MN$  sendo 1,5 cm. De acordo com Zorzi (2008), uma relação  $AB/MN$  entre 30 e 40 assegura uma razão sinal/ruído satisfatória e ainda preserva razoável resolução lateral. Os cálculos do fator  $K$  e de resistividade aparente para esse arranjo foram automatizados utilizando uma planilha desenvolvida no *software* Excel. Com os dados processados e utilizando a ferramenta *ColorRelief* do *software* Surfer 15, foi possível obter dois mapas de relevo sombreado de resistividade aparente, sendo cada mapa referente à etapa 1 e 2.

### 3.4.3 Levantamentos azimutais

Nos levantamentos eletrorresistivo azimutais, todos os ensaios foram iniciados com azimute igual a  $0^\circ$  (Figura 3.10). Para cada nova disposição dos eletrodos, implantou-se incrementos angulares de  $15^\circ$  até atingir o azimute de  $165^\circ$ . Como o método de eletrorresistividade possui simetria, os valores obtidos de resistividade foram repetidos para os azimutes entre  $180^\circ$  e  $345^\circ$ .

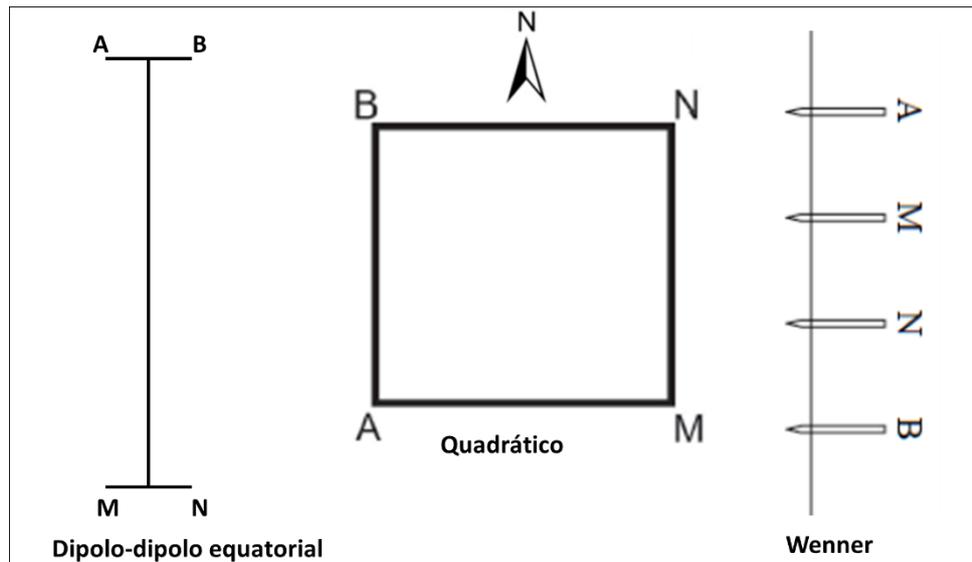


Figura 3.10 Disposição inicial dos eletrodos para cada arranjo nos levantamentos azimutais.

As resistividades aparentes obtidas para cada azimute foram plotadas em diagramas polares utilizando o *software* Grapher 11.

Para cada arranjo as propriedades específicas são:

- Dipolo-dipolo equatorial – Distância entre os eletrodos AB foi de 3,0 cm. A mesma distância foi utilizada nos eletrodos MN. O espaçamento entre os dipolos AB e MN utilizada foi 5 vezes maior  $a$ , logo 15,0 cm.
- Quadrático – Espaçamento entre os eletrodos foi de 10,0 cm - O levantamento foi executado realizando duas medições, chamadas de alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ), que são perpendiculares entre si. Os dados coletados na configuração  $\alpha$  correspondem aos azimutes de  $0^\circ$  a  $75^\circ$ . Já os dados coletados na configuração  $\beta$  correspondem aos azimutes de  $90^\circ$  a  $165^\circ$  (Lane *et al.* 1995). Tomou-se a direção que une os eletrodos A e B como a direção do azimute do arranjo.

Portanto, a primeira medição alfa coincide com a direção da família das fraturas NS.

- Wenner – Espaçamento entre os eletrodos igual a 9,0 cm.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS

### 4.1 PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO

Para os arranjos Dipolo-dipolo, Dipolo-dipolo equatorial, Quadrático e Wenner foi determinada a profundidade mediana de investigação (Tabela 4.1). Pode-se observar que a profundidade mediana de investigação mais rasa foi obtida para o primeiro nível de investigação do arranjo Dipolo-dipolo. Por outro lado, o arranjo Quadrático conseguiu atingir regiões mais profundas do tanque.

Tabela 4.1 Profundidade mediana de investigação

Arranjo	Espaçamento intereletrodo (cm)	Comprimento do arranjo (cm)	$Z_e/L$	Profundidade mediana de investigação (cm)
Dipolo-dipolo	4,0			
n = 1		12,0	0,139	1,67
n = 2		16,0	0,174	2,78
n = 4		24,0	0,203	4,87
n = 5		28,0	0,211	5,91
Dipolo-dipolo Equatorial	3,0	15,0	0,319	4,78
Quadrático	13,3	53,3	0,173	9,23
Wenner	9,0	27,0	0,173	4,67

Vale ressaltar que para o cálculo da profundidade mediana de investigação para o arranjo Quadrático, foi necessária a utilização da relação de equivalência (Equação 13) definida por Loke (1999), usando como referência o arranjo Wenner. Para esse arranjo, 10,0 cm de espaçamento intereletrodo possui espaçamento equivalente 13,3 cm e comprimento do arranjo equivalente igual a 53,3 cm.

A profundidade de investigação obtida para o arranjo Gradiente foi de 6,48 cm utilizando o cálculo definido por Bhattacharya & Dutta (1982), uma vez que a distância dos eletrodos  $AB = 48,0$  cm. Ou seja, o Gradiente apresenta maior profundidade de investigação com  $a = 1,5$  cm do que o Dipolo-dipolo com  $a = 4,0$  cm.

## 4.2 ARRANJO DIPOLO-DIPOLO

Os dados foram processados e invertidos pelo *software* Res2dInv. Com esses dados e utilizando o *software* Surfer 15 pôde-se obter mapas de resistividades para os levantamentos executados nas Etapa 1 e Etapa 2.

### 4.2.1 Etapa 1

O mapa de resistividade para a profundidade mediana de investigação igual a 1,67 cm (Figura 4.1) apresenta valores de resistividade variando entre 450  $\Omega \cdot m$  e 750  $\Omega \cdot m$ . A camada de areia acima do maciço possui espessura de 2,0 cm, então para essa profundidade de investigação esses valores de resistividade estão mais relacionados com a resistividade dessa cobertura do que do maciço. Entretanto, pode-se observar três alinhamento resistivos de direção NS de menor resistividade.

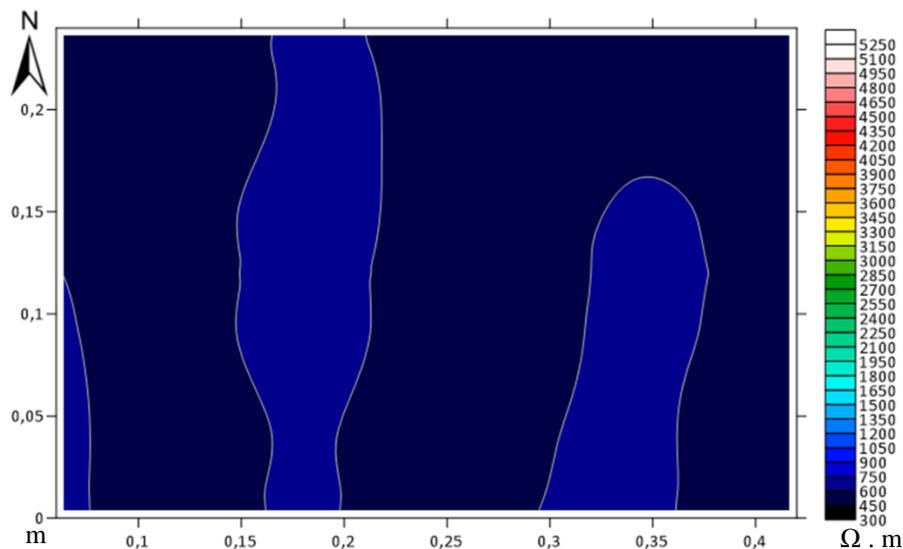


Figura 4.1 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 1, com profundidade mediana de investigação igual de 1,67 cm.

Para a profundidade mediana de investigação igual a 2,78 cm, o mapa de resistividade apresenta valores de resistividade variando entre 450  $\Omega \cdot m$  e 1050  $\Omega \cdot m$  (Figura 4.2). Os baixos valores de resistividade sugerem influência significativa da cobertura de areia nesses resultados. Mais uma vez, três lineamentos de resistividade mais baixa no azimute zero foram identificados

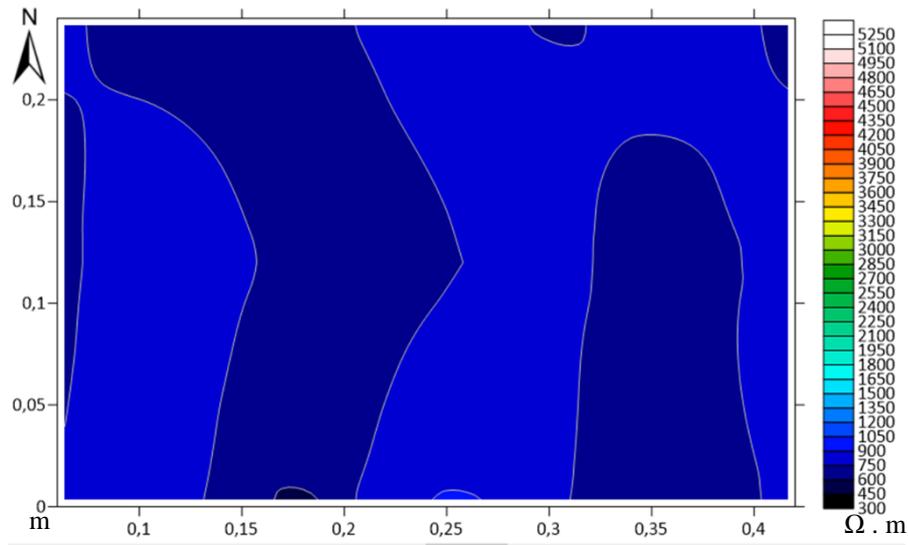


Figura 4.2 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 1 com profundidade mediana de investigação igual de 2,78 cm.

Maiores valores de resistividade foram obtidos para a profundidade mediana de investigação igual a 4,87 cm. O mapa de resistividade para essa profundidade (Figura 4.3) apresenta valores de resistividade variando entre 1050  $\Omega \cdot m$  e 2400  $\Omega \cdot m$ . Para essa profundidade, a cobertura de areia pouco ou nada influencia nesses resultados.

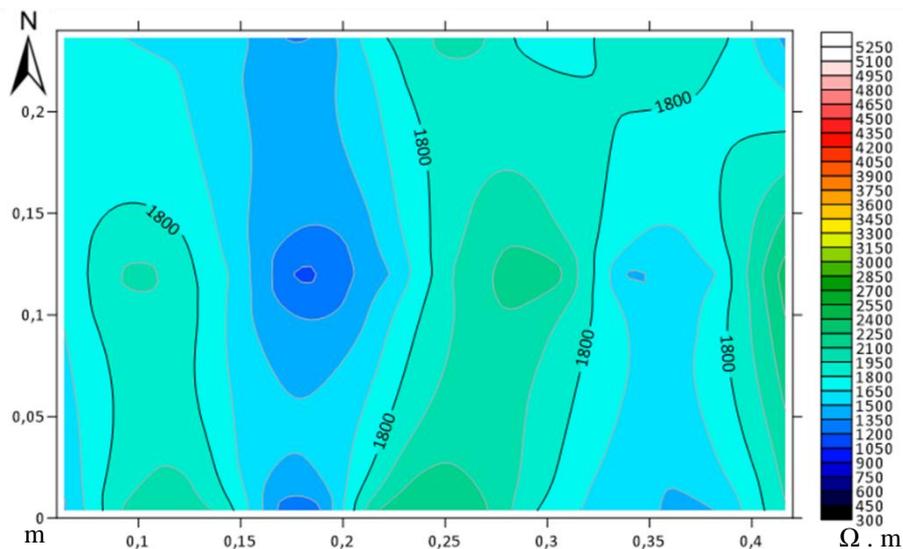


Figura 4.3 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 1, com profundidade mediana de investigação igual de 4,87 cm.

Alinhamentos resistivos se tornaram mais evidentes nessa profundidade mediana de investigação, sugerindo a presença de três lineamentos NS bem marcados. A nordeste da área do maciço observa-se uma inflexão que pode indicar influência da família de direção N60E.

O mapa de resistividade para a profundidade mediana de investigação igual a 5,91 cm (Figura 4.4) apresenta o maior intervalo de valores de resistividade, entre 2100  $\Omega \cdot m$  e 5250  $\Omega \cdot m$ , indicando que porções maiores do maciço rochoso foram investigados. Como a área de investigação é menor, apenas uma descontinuidade NS de baixa resistividade foi agora identificada.

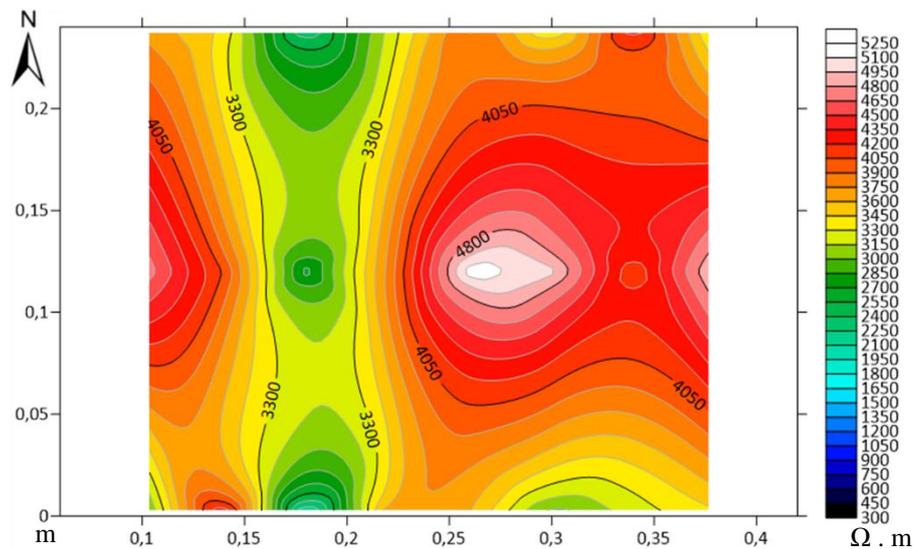


Figura 4.4 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 1, com profundidade mediana de investigação igual de 5,91 cm.

#### 4.2.2 Etapa 2

O mapa de resistividade para a profundidade mediana de investigação igual a 1,67 cm (Figura 4.5) apresenta valores de resistividade variando entre 300  $\Omega \cdot m$  e 600  $\Omega \cdot m$ . Como o maciço está coberto por uma camada de areia com 2,0 cm de espessura, para essa profundidade mediana de investigação os valores de resistividade estão mais relacionados com a cobertura e não com o maciço. Dois lineamentos de resistividade NS podem ser identificados, e o central mostrou anomalia mais larga que o da Etapa 1 na mesma profundidade (Figura 4.5), o que pode ser justificado pela anomalia central mais ampla.

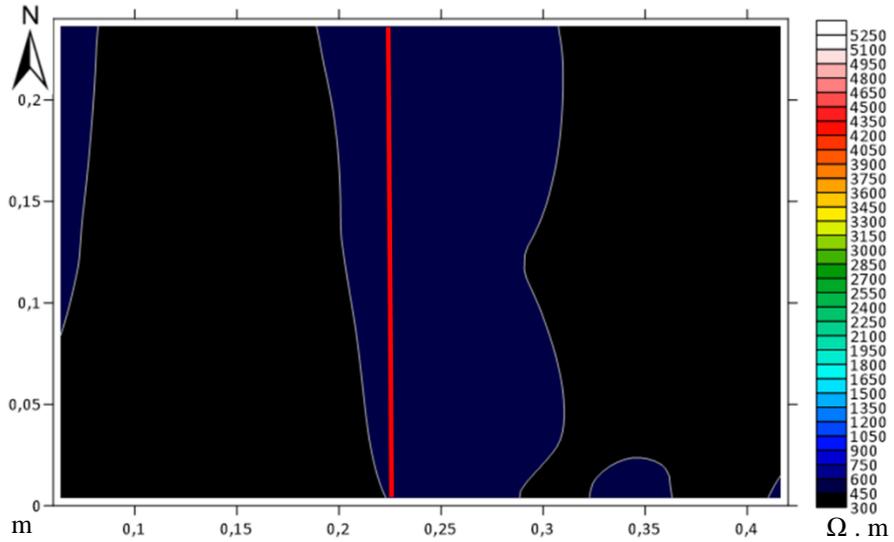


Figura 4.5 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 2, com profundidade mediana de investigação igual de 1,67 cm. A linha vermelha representa a fratura central com abertura de 1,0 cm.

Para a profundidade mediana de investigação igual a 2,78 cm, o mapa de resistividade apresenta valores de resistividade variando entre 450  $\Omega \cdot m$  e 750  $\Omega \cdot m$  (Figura 4.6). Apesar desse levantamento já atingir mais o maciço, os baixos valores de resistividade ainda sugerem influência significativa da cobertura de areia nos resultados.

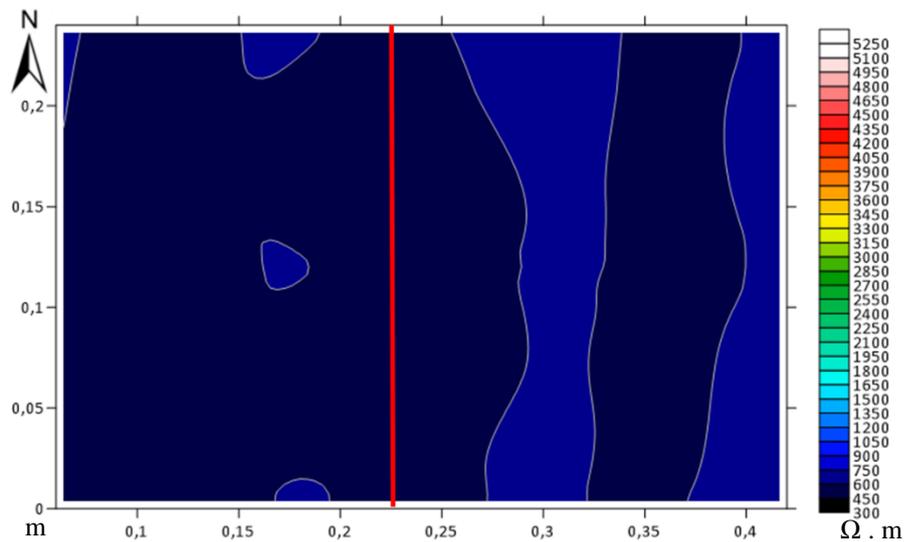


Figura 4.6 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 2, com profundidade mediana de investigação igual de 2,78 cm. A linha vermelha representa a fratura central com abertura de 1,0 cm.

Neste caso, 3 anomalias de baixa resistividade de direção NS podem ser identificadas, mas estas não são coincidentes com a fratura central mais aberta.

Os mapas de resistividade (Figuras 4.7 e Figura 4.8) para as profundidades medianas de investigação iguais a 4,87 cm e 5,91 cm apresentam um evidente alinhamento resistivo com direção NS ao longo da região central, consequência da fratura central com abertura de 1,0 cm. Para a profundidade mediana de investigação igual a 4,87 cm, os limites de resistividade variam entre 750  $\Omega \cdot m$  e 2250  $\Omega \cdot m$ . Quando a profundidade mediana de investigação é igual a 5,91 cm, 450  $\Omega \cdot m$  e 5250  $\Omega \cdot m$  são os limites da variação da resistividade. Como na etapa 1, três anomalias e uma anomalia de baixa resistividade de direção NS foram identificados nas profundidades de 4,87 e 5,91cm. Porém, nestas duas profundidades desta etapa, a fratura central mais aberta ficou muito bem delimitada pela baixa resistividade

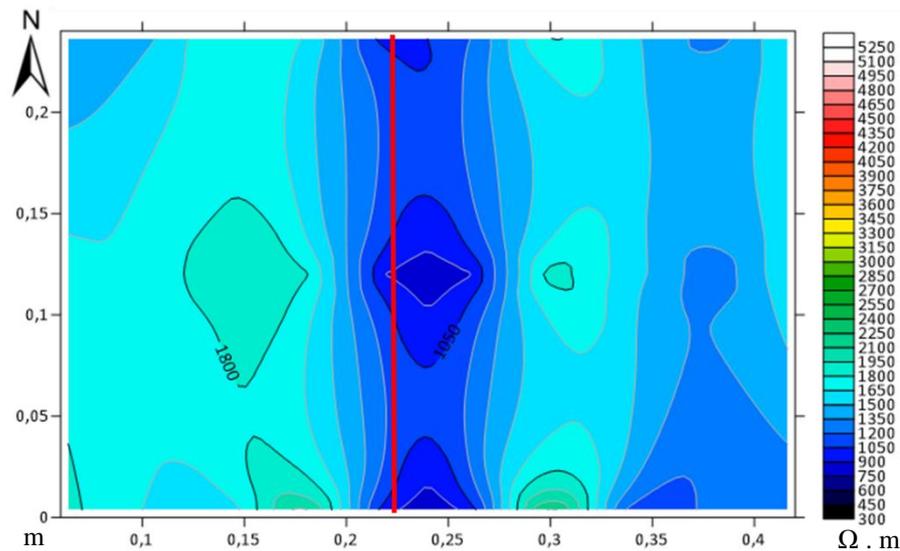


Figura 4.7 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 2, com profundidade mediana de investigação igual de 4,87 cm. A linha vermelha representa a fratura central com abertura de 1,0 cm.

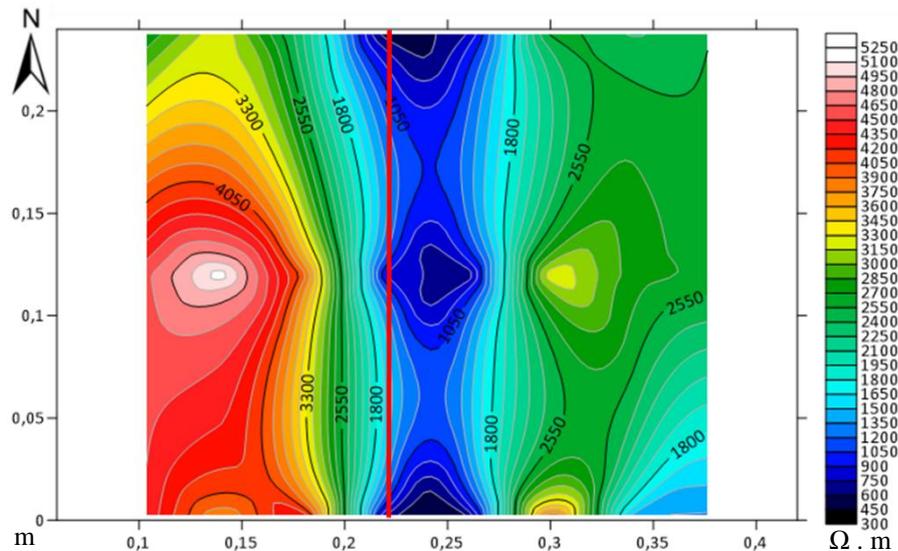


Figura 4.8 Mapa de resistividade no levantamento Dipolo-dipolo, etapa 2, com profundidade mediana de investigação igual de 5,91 cm. A linha vermelha representa a fratura central com abertura de 1,0 cm.

De acordo com Dentith & Mudge (2014), zonas com propriedades elétricas anômalas logo abaixo dos eletrodos de corrente, ou de potencial, vão afetar as leituras independentemente da localização dos outros eletrodos. Essa afirmação corrobora com a hipótese de que a fratura central com maior abertura influenciou nos alinhamentos resistivos produzidos próximos da região central.

Em suma, este arranjo foi efetivo para caracterizar a tendência de resistividades menores ao longo de discontinuidades NS, mas se mostrou ineficiente para a detecção da família de fraturas N60E. Contudo, o espaçamento entre eletrodos utilizado não se mostrou eficiente para caracterizar as inúmeras fraturas de direção NS, especialmente nas profundidades de investigação mais baixas, que abrangem maior área de investigação. As hipóteses que explicam esse resultado são:

- A família de fraturas NS é mais frequente do que as famílias de fraturas N60E (Figura 3.5 e Figura 3.6);
- As discontinuidades N60E são menos contínuas do que as discontinuidades NS (Figura 3.5 e Figura 3.6);
- O caminhamento executado no levantamento é ortogonal a família de fraturas NS o que favorece a detecção dessa família (Orellana 1972).

### 4.3 ARRANJO GRADIENTE

#### 4.3.1 Etapa 1

O mapa de relevo sombreado de resistividade aparente (Figura 4.9) possui valores que variam entre  $600 \Omega \cdot m$  e  $1350 \Omega \cdot m$ . Esse fato indica que para a profundidade de investigação (6,48 cm) esses valores de resistividade podem estar parcialmente influenciados pela cobertura de areia.

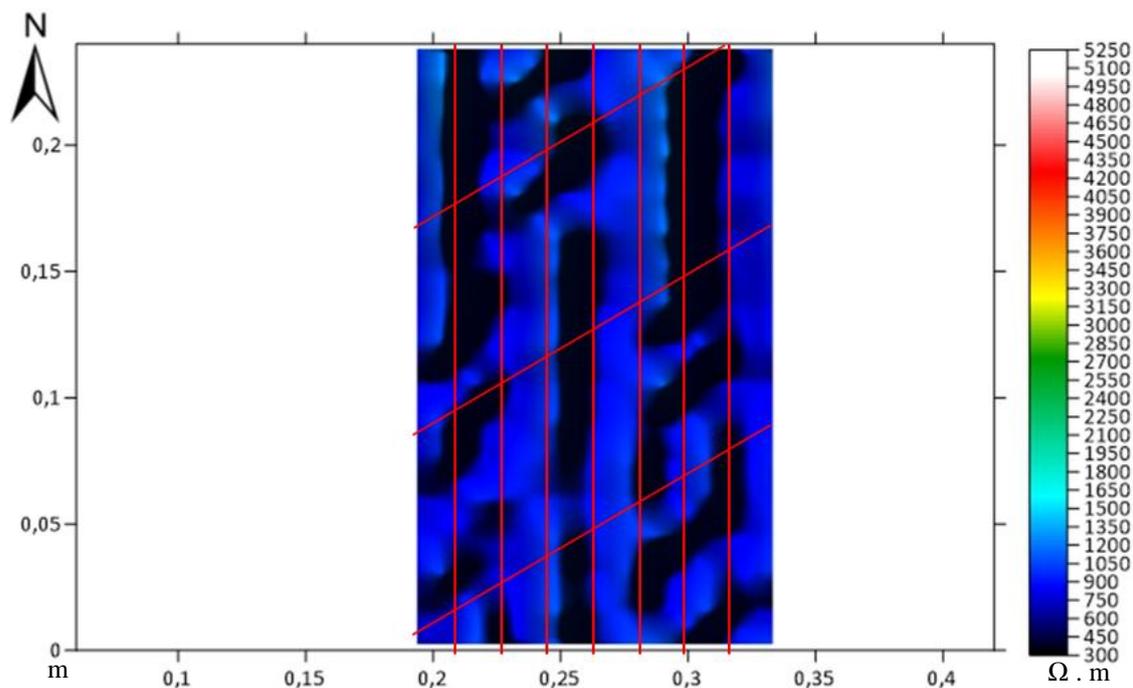


Figura 4.9 Mapa de relevo sombreado de resistividade aparente no levantamento Gradiente, etapa 1, com profundidade de investigação igual de 6,48 cm. Linhas vermelhas representam as descontinuidades NS e N60E do maciço.

Outro aspecto relevante situa-se no fato desse mapa apresentar uma série de alinhamentos resistivos NS e alinhamentos resistivos menores NE. O interessante é que pode-se até estimar a quantidade de descontinuidades verticais. Uma estimativa possível é aferir a presença de 5 descontinuidades NS e 4 descontinuidades NE. As descontinuidades presentes na região que o levantamento foi executado são 7 descontinuidades NS e 3 descontinuidades N60E. A coincidência entre a posição das descontinuidades no modelo e do levantamento não é exata, mas é possível que uma inversão dos dados geofísicos pode melhorar os resultados.

### 4.3.2 Etapa 2

Para essa etapa, o mapa de relevo sombreado de resistividade aparente (Figura 4.10) apresenta valores que variando entre  $450 \Omega \cdot m$  e  $5100 \Omega \cdot m$ . Os baixos valores de resistividade aparente são produtos da influência da cobertura de areia.

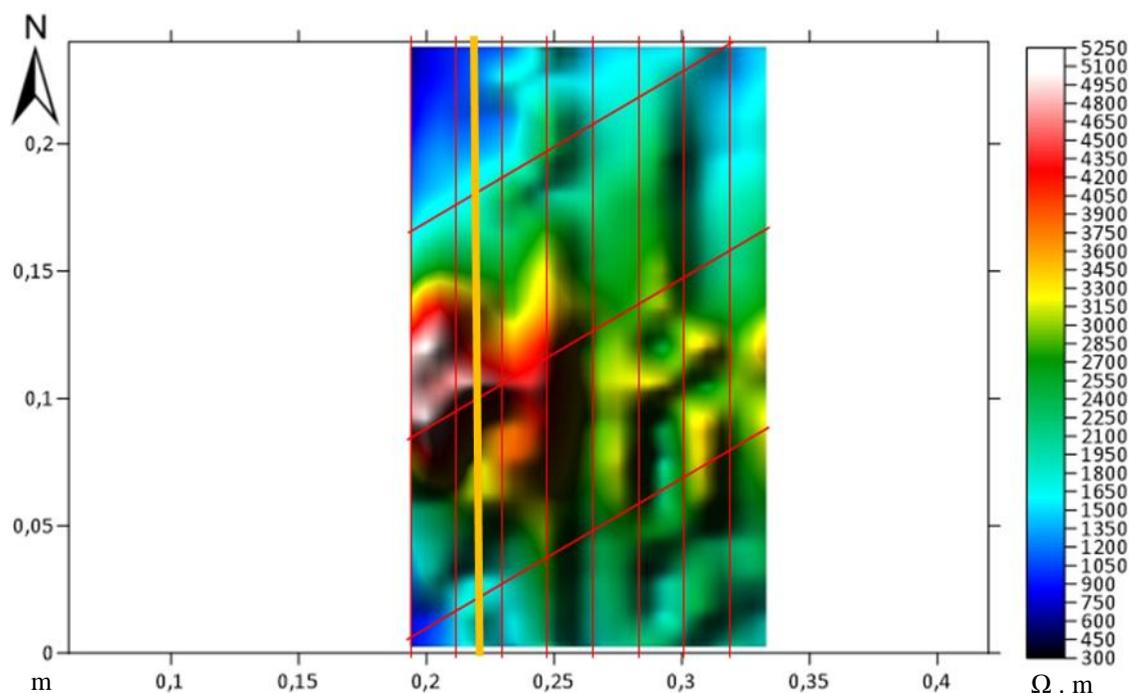


Figura 4.10 Mapa de relevo sombreado de resistividade aparente no levantamento Gradiente, etapa 2, com profundidade de investigação igual de 6,48 cm. Linhas vermelhas representam as descontinuidades NS e N60E do maciço. Linha amarela representa a fratura central com 1,0 cm.

Novamente pode-se observar alinhamentos com direção NS e outros menores com direção NE. Pode-se até estimar a quantidade de descontinuidades subverticais. Nesse caso, 5 descontinuidades NS e 2 descontinuidades NE podem ser estimadas. A fratura central mais aberta não foi identificada onde deveria, o que pode ser explicado por algum problema nas medidas elevadas de resistividade na parte oeste do levantamento.

Os maiores valores de resistividade aparente estão concentrados na parte central do mapa e próximos fratura central com maior abertura. Mais uma vez, pode-se explicar esse fato levantando a hipótese de que essa fratura de maior abertura afetou os dados adquiridos próximos da região central

Resumidamente, este arranjo caracterizou com mais precisão as descontinuidades NS e N60E, o que em parte pode ser explicado pelo espaçamento intereletrodo menor (1,5 cm) quando comparado com o arranjo Dipolo-dipolo.

## 4.4 ARRANJO DIPOLO–DIPOLO EQUATORIAL

### 4.4.1 Etapa 1

O diagrama polar (Figura 4.11) produzido para esse arranjo apresenta os menores valores de resistividade aparente para os azimutes  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ . Portanto, pode-se afirmar que esse arranjo caracterizou a descontinuidade NS, mas talvez com uma influência do conjunto N60E, o que explicaria esses baixos valores de resistividade aparente nos azimutes de  $0^\circ$  a  $45^\circ$ .

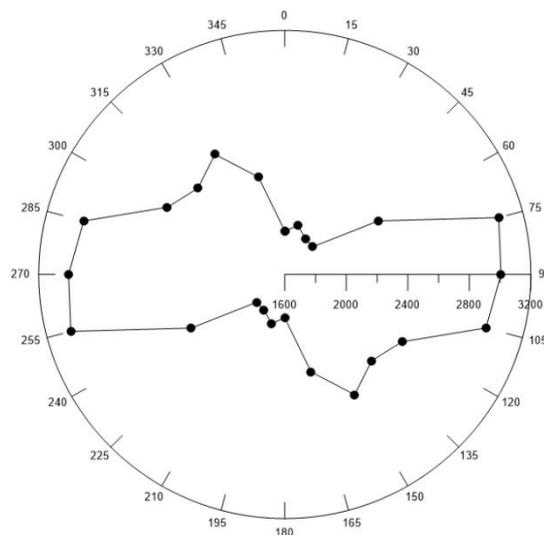


Figura 4.11 Diagrama polar de resistividade aparente para o arranjo Dipolo-dipolo equatorial, para a etapa 1, com espaçamento interletrado de 3,0 cm e espaçamento entre dipolos de 15,0 cm.

### 4.4.2 Etapa 2

Com a fratura central com maior abertura, o diagrama polar de resistividade aparente apresenta seu valor mínimo no azimute  $105^\circ$  (Figura 4.12). Contudo, este valor provavelmente está errado, pois a resistividade aparente foi muito mais baixa que a esperada para este arranjo nestas condições (Moreira 2016), com uma variação muito abrupta em relação ao azimute vizinho. Pode ter ocorrido um curto circuito ou algum erro de leitura. Portanto, desconsiderando-se este valor, pode-se afirmar que o resultado foi bom, embora não tenha sido possível discriminar os dois conjuntos de fraturas.

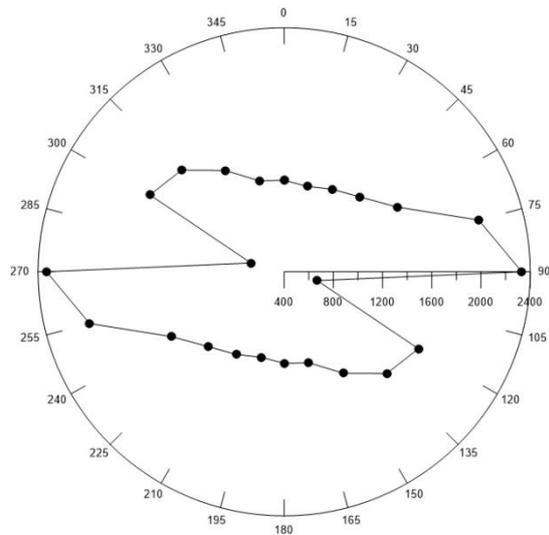


Figura 4.12 Diagrama polar de resistividade aparente para o arranjo Dipolo-dipolo equatorial, para a etapa 2, com espaçamento interletrado de 3,0 cm e espaçamento entre dipolos de 15,0 cm.

## 4.5 ARRANJO QUADRÁTICO

Para esse arranjo será adotado que a direção da fratura principal é perpendicular a direção de resistividade máxima. Essa interpretação é adotada por Lane *et al.* (1995) e Bayewu *et al.* (2016). Vale mencionar que o azimute desse arranjo é definido como sendo a linha que conecta os eletrodos de corrente AB.

### 4.5.1 Etapa 1

O diagrama polar de resistividade aparente (Figura 4.13) apresenta uma concentração de picos resistivos entre os azimutes de 90° a 120° e de baixa resistividade entre 0° a 30°, com média de 15°. Este comportamento pode ser explicado pela resposta conjunta das 2 famílias de fraturas, mas com maior peso para a família 1, mais frequente e mais contínua.

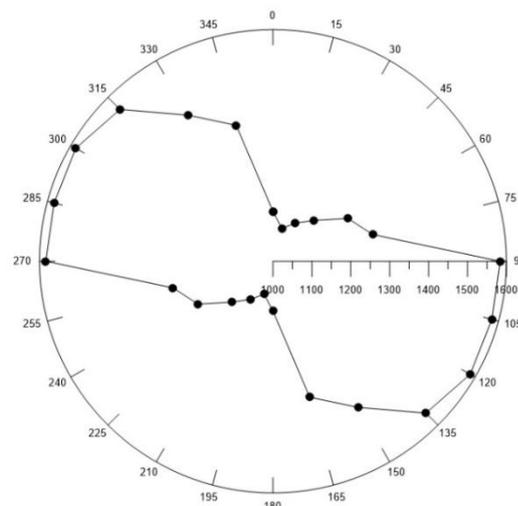


Figura 4.13 Diagrama polar de resistividade aparente para o arranjo Quadrático, para a etapa 1, com espaçamentos entre eletrodos de 10 cm.

#### 4.5.2 Etapa 2

O diagrama de polar de resistividade aparente obtido (Figura 4.14) apresenta valores máximos de resistividade aparente para o azimute 90°, 105° e 120°. Isto confirma que o arranjo apresentou uma resposta que reflete a influência dos 2 conjuntos de fraturas, mas com maior influência do conjunto NS, por conta da fratura mais aberta central.

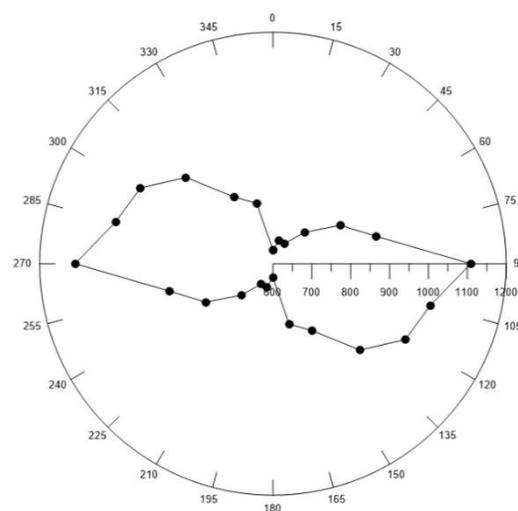


Figura 4.14 Diagrama polar de resistividade aparente para o arranjo Quadrático, para a etapa 2, com espaçamentos entre eletrodos de 10 cm.

## 4.6 ARRANJO WENNER

O espaçamento dos eletrodos empregados nesse arranjo é de 9,0 cm e a cobertura do solo de 2,0 cm, implicando um relação  $a/h$  é igual a 4,5. Esse valor está fora dos limites para a ocorrência do paradoxo de anisotropia determinados por Watson & Barker (2010). Outro fator que contribui a não considerar esse paradoxo no momento de interpretar os resultados é a geometria das descontinuidades no maciço. Essa geometria é bastante similar à geometria das fraturas expostas por Taylor & Fleming (1988) (Figura 2.15 – a) em que o paradoxo de anisotropia não foi observado nos resultados. Portanto, o resultado esperado é que a direção da descontinuidade seja paralela aos azimutes dos valores mínimos de resistividade aparente.

### 4.6.1 Etapa 1

O diagrama polar de resistividade aparente obtida nesse levantamento (Figura 4.15) apresenta valor mínimo para o azimute de  $90^\circ$ . Além disso, um mínimo de resistividade aparente relativo pode ser observado para o azimute de  $150^\circ$ . Portanto, as descontinuidades NS e N60E não foram caracterizadas nessa etapa do levantamento, diferentemente dos resultados encontrados por Moreira (2016), que encontrou bons resultados com este arranjo

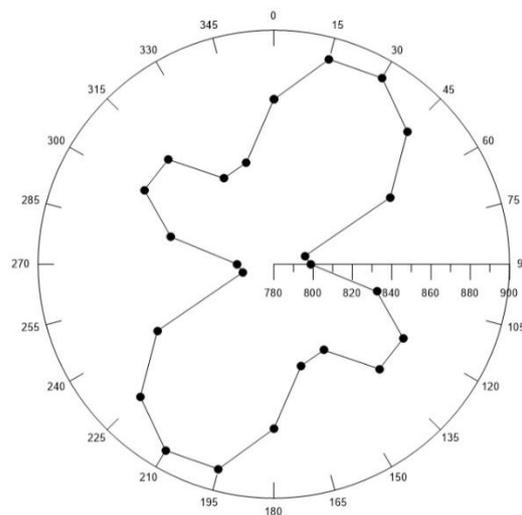


Figura 4.15 Diagrama polar de resistividade aparente para o arranjo Wenner, para a etapa 1, com espaçamentos entre eletrodos de 9,0 cm.

#### 4.6.2 Etapa 2

O diagrama polar obtido para essa etapa (Figura 4.16) apresenta no azimute  $0^\circ$  um dos menores valores de resistividade aparente. Logo, a descontinuidade NS foi caracterizada por esse arranjo. Essa caracterização pode ter sido favorecida por causa da fratura central com maior abertura. Para o azimute  $120^\circ$  pode-se observar uma anomalia elétrica de baixa resistividade aparente, para a qual não existe explicação.

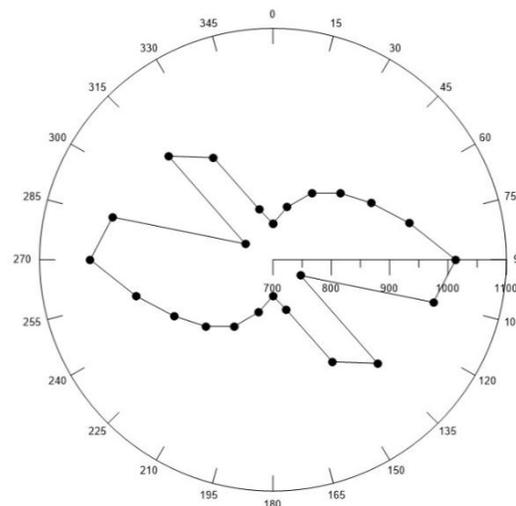


Figura 4.16 Diagrama polar de resistividade aparente para o arranjo Wenner, para a etapa 2, com espaçamentos entre eletrodos de 9,0 cm

Concisamente, esse arranjo só conseguiu detectar a descontinuidade NS apenas para a segunda etapa do levantamento, mas este resultado é duvidoso, uma vez que outra anomalia não justificada foi encontrada. Em nenhuma das etapas a família de fraturas N60E foi caracterizada.

#### 4.7 COMPARAÇÃO ENTRE O ARRANJO DIPOLO-DIPOLO E GRADIENTE

Com o intuito de comparar esses dois arranjos, foram elaborados mapas de relevo sombreados para as duas etapas utilizando apenas 6 perfis paralelos (Figura 4.17 e Figura 4.18). As ordenadas desses perfis (em m) são 0,000, 0,045, 0,090, 0,150, 0,195 e 0,240. O objetivo destes mapas foi de avaliar se o arranjo gradiente poderia mostrar bons resultados mesmo com uma densidade menor de informações.

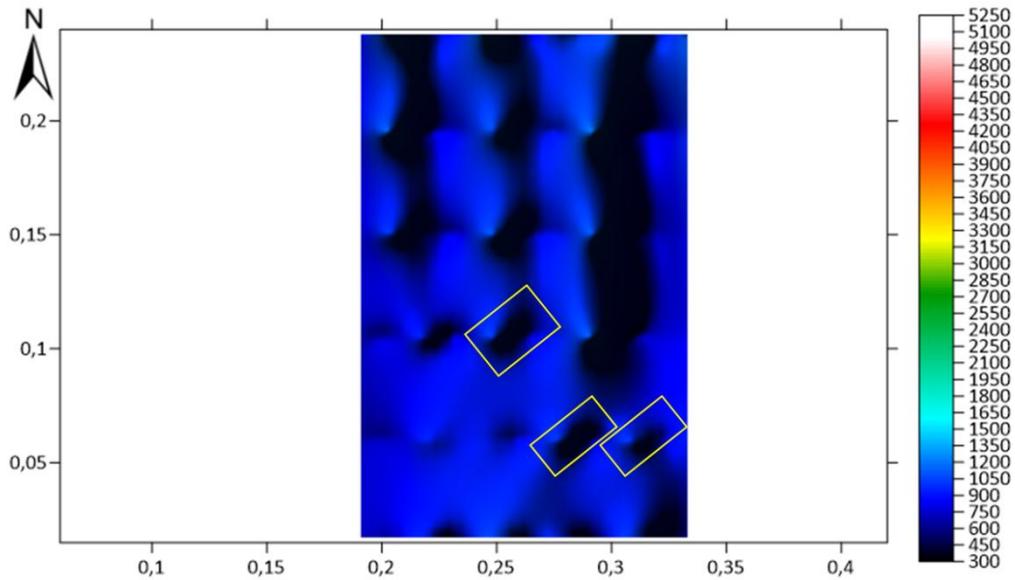


Figura 4.17 Mapa de relevo sombreado de resistividade aparente no levantamento Gradiente, etapa 1, com profundidade de investigação igual de 6,48 cm utilizando apenas 6 perfis paralelos. Em destaque algumas fraturas NE detectadas.

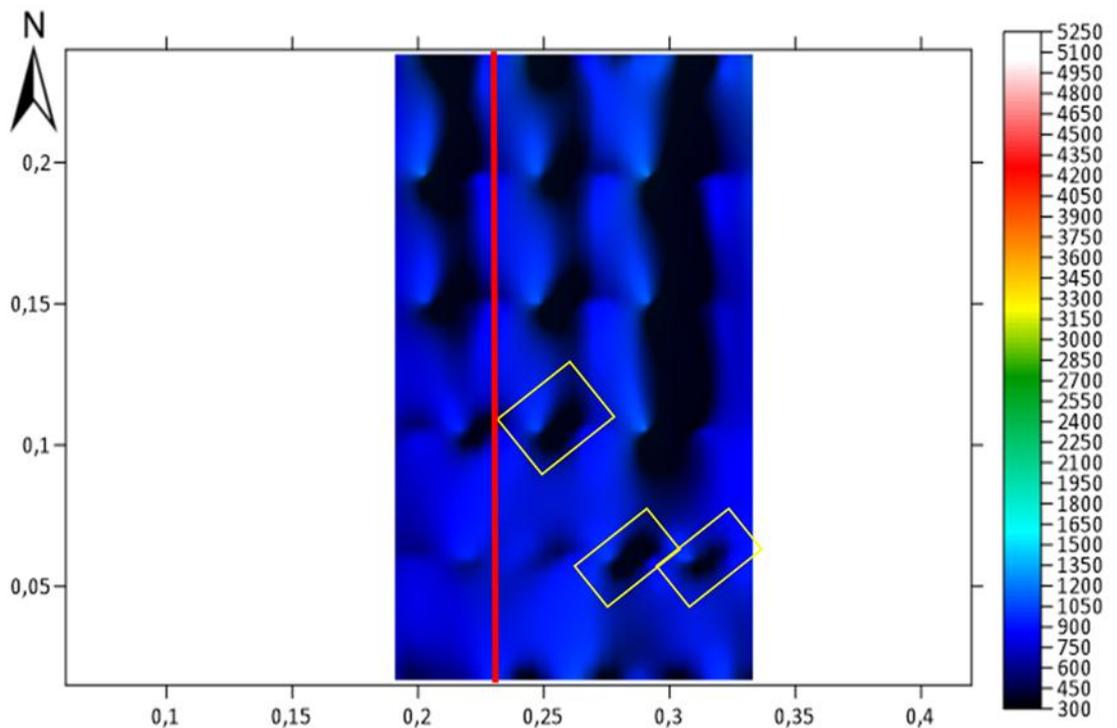


Figura 4.18 Mapa de relevo sombreado de resistividade aparente no levantamento Gradiente, etapa 2, com profundidade de investigação igual de 6,48 cm utilizando apenas 6 perfis paralelos. Em destaque amarelo algumas fraturas NE detectadas. A linha vermelha representa a fratura central com abertura de 1,0 cm.

Pode-se observar que para as duas etapas a descontinuidade NS foi caracterizada. Pequenas famílias de fraturas NE também podem ser identificadas.

Diante disso, os resultados indicam que o arranjo Gradiente apresentou melhores resultados que o Dipolo-dipolo com 3 linhas de aquisição. Como discutido no item 4.1, o arranjo Gradiente apresenta maiores profundidades de investigação que o Dipolo-dipolo. Se neste estudo fosse empregado no arranjo Dipolo-dipolo o espaçamento de eletrodos de 1,5 cm, como no gradiente, a profundidade mediana de investigação seria de cerca de 2,9 cm, por exemplo. Além disso, durante a execução do levantamento, o arranjo Gradiente movimenta apenas 2 eletrodos enquanto o Dipolo-dipolo movimenta 4 eletrodos. Esse fator pode apresentar vantagens significativas para execuções em campo e deve ser levado em conta no momento da decisão da escolha do arranjo.

#### **4.8 SÍNTESE DOS RESULTADOS**

Os principais resultados para os diferentes arranjos estão resumidos na Tabela 4.2. Com relação à detecção de famílias de descontinuidades, atribuiu-se arbitrariamente as seguintes notas a esse fator:

- Nota 1 – Resultado não satisfatório;
- Nota 2 – Resultado satisfatório, porém não evidente;
- Nota 3 – Resultado evidente e de fácil interpretação.

Tabela 4.2 Quadro resumo dos principais resultados para os diferentes arranjos utilizados nessa pesquisa.

<b>Etapa 1</b>			
Arranjo	Número de famílias detectadas		
	Duas	Uma	Resposta média das duas famílias de fraturas
Dipolo-dipolo	3	1	1
Gradiente	3	2	1
Dipolo-dipolo equatorial	1	1	3
Quadrático	1	1	3
Wenner	1	1	1
<b>Etapa 2</b>			
Dipolo-dipolo	3	1	1
Gradiente	3	2	1
Dipolo-dipolo equatorial	1	1	3
Quadrático	1	1	3
Wenner	1	1	1

Concluindo, o arranjo gradiente se mostrou muito eficaz para caracterizar as duas famílias de descontinuidades, com resultados melhores do que o Dipolo-dipolo. Os arranjos azimutais Dipolo-Dipolo equatorial e Quadrático mostraram bons resultados, embora não tenham permitido distinguir os dois padrões de fraturas. O arranjo Wenner azimutal, considerado o mais eficaz por Moreira (2016), não apresentou bons resultados neste estudo.

Pereira, V. C. 2019, Comparação de diversos arranjos de eletrorresistividade para caracterização de descontinuidades em maciços rochosos fraturados.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

---

Os resultados obtidos pelos levantamentos indicam que, dentre os arranjos empregados por eletroresistividade, o Gradiente se mostrou mais eficaz na detecção de dois planos de descontinuidades subverticais, em maciços rochosos. Esse arranjo caracterizou de forma clara uma família de descontinuidade mais frequente, com direção NS, e de forma mais sutil uma segunda descontinuidade com direção NE, menos frequente. Nesse arranjo foi possível estimar de forma aproximada o número de fraturas subjacentes, diferentemente do Dipolo-dipolo, que permitiu mostrar somente tendência de lineamentos NS. Isto se explica em parte porque o Dipolo-dipolo foi adquirido com maior espaçamento intereletrodos, mas espaçamentos menores, como os do gradiente, diminuiriam substancialmente a profundidade de investigação. Cabe destacar que o padrão NE pode também não ter sido bem caracterizado pelo fato destes levantamentos terem sido feitos em direção (EW) oblíqua a sua direção.

O arranjo Gradiente apresentou melhor detecção das descontinuidades do que o arranjo Dipolo-dipolo. Esse resultado se repete mesmo utilizando diferentes números de perfis paralelos. Essa superioridade na identificação das descontinuidades pode ser observada utilizando 6 e 17 perfis. Outra vantagem do arranjo Gradiente é que durante a execução do levantamento apenas 2 eletrodos são deslocados. Para o arranjo Dipolo-dipolo é necessária a movimentação de 4 eletrodos em todo o processo de aquisição de dados. Para levantamentos em campo, essa vantagem pode ser expressiva e deve ser levada em conta no momento da escolha do arranjo.

Os levantamentos azimutais não mostraram bons resultados para a detecção das famílias de descontinuidades, pois não permitiram distinguir as duas famílias, resultando numa resposta média, com baixa resistividades para NNE, com maior influência da família N. O número de medidas (a cada 15°) pode ter contribuído para esta não diferenciação. O arranjo Wenner apresentou os piores resultados entre os azimutais, diferentemente ao encontrado por Moreira (2016), que encontrou bons resultados para este arranjo. Na segunda etapa dos levantamentos, para todos os arranjos houve caracterização da fratura central com maior abertura. Essa descontinuidade afetou os dados adquiridos em suas proximidades nos levantamentos executados por caminhamento elétrico. Com relação aos levantamentos

azimutais, a influência da fratura central com maior abertura fez com que a identificação das descontinuidades NS se tornasse evidentes nos diagramas polares obtidos.

Seguem as sugestões para estudos futuros:

- Execução dos levantamentos por caminhamento elétrico com resistivímetros com multicanais e com aquisição automática das medidas. Isso provocaria uma diminuição do tempo necessário para executar o levantamento;
- Executar os levantamentos para os arranjos Dipolo-dipolo e Gradiente com as linhas de caminhamento ortogonais a família de descontinuidades N60E. Isso tornaria possível identificar se a dificuldade encontrada para caracterizar essas fraturas deve-se ao fato dos levantamentos executados para esses arranjos não serem ortogonais a essas descontinuidades;
- Verificar os valores de resistividade que mostrarem desvios significativos da tendência (mudanças abruptas de resistividade) com a execução de medidas inversas (troca dos eletrodos A e B ou M e N) e recíprocas (troca dos eletrodos AB por MN). Esta medida pode solucionar problemas de medidas, sobretudo nos arranjos azimutais;
- Fazer medidas de resistividade nos arranjos azimutais não somente nos azimutes 0 a 174, mas sim de 0 a 345. Além disto, recomenda-se ampliar o número de medidas, por exemplo a cada 7,5°, para analisar se os arranjos azimutais conseguem melhor discriminar os dois padrões de fraturas;
- Executar um levantamento para o arranjo Dipolo-dipolo com mais perfis paralelos a fim de verificar se com o aumento da densidade de medidas torna-se possível a identificação da família de fraturas N60E;
- Encontrar um ambiente geológico com estruturas geológicas similares às empregadas nesse trabalho com o intuito de examinar se os resultados obtidos em laboratório nessa pesquisa se assemelham com situações de campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Asare, V. S., Gyasi, E. Okyere, B. F. 2015. Azimuthal Resistivity Sounding with the symmetric Schullumberger and the Alfa Wenner array to study subsurface electrical anisotropy variation with depth. *Internatiol Journal of Scientific and Research Publication*, **5**(5): 11.
- Avelar, A. S., Lacerda, W. A., Netto, A. L. C. 2004. Modelos reduzidos em base física aplicados aos processos geomorfológicos. *In: X Simpósio Nacional de Geomorfologia*.
- Barker, R. D. 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, **54**: 1031–1037.
- Bayewu, O. O., Oloruntola, M. O., Mosuro, G. O., Laniyan, T. A., Fatoba, J. O. Folorunso, I. O., Kolawole, A. U., Bada, B. T. 2016. Application of cross-square array and resistivity anisotropy for fracture detection in crystalline bedrock. *Arabian Journal of Geosciences*, **9**: 291.
- Bhattacharya, B., Dutta, I., 1982. Depth of investigation studies for gradient arrays over homogeneous isotropic half-space. *Geophysics*, **47**: 1198–1203.
- Bolshakov, D. K., Modin, I. N., Pergavo E. V., Shevnin, V.A. 1998. Modeling and interpretation of azimuthal resistivity sounding over two-layered model with arbitrary – oriented anisotropy in each layer. *In: EAGE 60<sup>th</sup> Conference*.
- Borssatto, K. 2018. *Prospecção geofísica em depósito de ouro filoniano na Região de Cerrito do Ouro, São Sepé – RS*. Tese de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 50p.
- Braga, A. C. O. 2007. *Métodos geoeletricas aplicados nos estudos de captação e contaminação das águas subterrâneas*. São Paulo, UNESP, 79p.
- Bueno, L. R., Hoeltgebaum, L. E. B., Avanzi, E. D. 2012. Estudo de arrancamento de grampos em modelos reduzidos. *In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*
- Busby, J. P. 2000. The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations. *Geophysical Prospecting*, **48**: 677–695.

Pereira, V. C. 2019, Comparação de diversos arranjos de eletrorresistividade para caracterização de descontinuidades em maciços rochosos fraturados.

Campos, A. F. 2004. *Utilização de métodos geoeletricas na caracterização de rochas fraturadas: Estudo de caso nos arenitos do Grupo Itararé – Bacia do Paraná*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 104p.

Capello, B. S. C., Tarqui, J. L. Z., Saliba, A. P. M., Martinez, C. B., Viana, E. M. F. 2017. Técnica de produção e uso de sedimentos artificiais para ensaios de modelos reduzidos de Usinas Hidrelétricas. *In: The 12th Latin-American Congress on electricity generation and transmission*.

Carlson, D. A., Taylor, R. W., Cherkauer, D. S. 1996. Azimuthal electrical resistivity as a tool for determination of the orientation of preferred hydraulic transmissivity for a dolomite aquifer in southeastern Wisconsin. *In: 9th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*.

Dentith, M., Mudge, S. T. 2014. *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge, Cambridge University Press, 426p.

Edwards, L. S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, **42**(5): 1020-1036.

Essien, E. E., Ehirim, C. N. 2009. Comparative investigation of offset Wenner, Square and Schumberger arrays in electrical anisotropy studies. *Scientia Africana*, **8**(2): 53-60.

Gallas, J. D. F., Taiolo, F., Filho, W. M., Prado, R. L., Dourado, J. C. 2001. Métodos e técnicas geoeletricas rasas na delimitação de área afetada por ruptura em teto de túnel urbano. *Brazilian Journal of Geophysics*, **19**(1): 33-46.

Gandolfo, O. C. B. 2007. *Um estudo de imageamento geoeletrico na investigação rasa*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 215p.

Goudswaard, W. 1957. On the effect of the tank wall material in geoelectrical model experiments. *Geophysical Prospecting*, **5**: 272-281.

Habberjam, G. M. 1979. Apparent resistivity observations and the use of square array techniques. *Geoexploration Monographs* **9**.

Habberjam, G. M., Watkins, G. E. 1967. The use of a square configuration in resistivity prospecting. *Geophysical Prospecting*, **15**: 221-235.

- Hellman, K., Johansson, S., Olsson, P., Dahlin, T. 2016. Resistivity inversion software comparison. *In: Proceedings of the 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geoscience.*
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. 2009. *Geofísica de exploração*. São Paulo, Oficina de textos, 429p.
- Keller, G. V., Frischknecht, F. C. 1966. *In: Electrical methods in geophysical prospecting*: Pergamon Press.
- Lane, J. W., Haeni, F. P., Watson, M. 1995. Use of saque array direct-current resistivity method to detect fractures in crystallin bedrock in New Hampshire. *Ground Water*, **33**(3): 476-485.
- Lazzarim, T. P. 2015. *Espalhamento de rejeitos em cenários de ruptura de barragens – Simulações em modelo reduzido e proposta de método para avaliação de área atingida*. Tese de Mestrado. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 120p.
- Leonard-Mayer P. 1984. A surface resistivity method for measuring hydrologic characteristics of jointed formations. *Mines Report of Investigations*, 8901. Bureau of Mines, United States Department of the Interior.
- Loke, M. H. 1999 .*Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. <  
[http://moho.ess.ucla.edu/~pdavis/ESS135\\_2013/LITERATURE/%20LokeDCREsistivity.pdf](http://moho.ess.ucla.edu/~pdavis/ESS135_2013/LITERATURE/%20LokeDCREsistivity.pdf)>  
. Acesso em 10/jan/2019.
- Luling, M. G. 2013. The paradox of anisotropy in electric logging: A simple proof and extensions to other physics domains. *Geophysics*, **28**(1): 1-8.
- Moreira, S. S. 2016. *Levantamentos geométricas azimutais em modelos reduzidos para caracterização de maciços fraturados*. Tese de Mestrado. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 168p.
- Olayinka, A. I., Yaramanci, U. 2000. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*, **45**: 63-81.

Pereira, V. C. 2019, Comparação de diversos arranjos de eletrorresistividade para caracterização de descontinuidades em maciços rochosos fraturados.

Olayinka, A. I., Yaramanci, U. 2002. Smooth and sharp-boundary inversion of two-dimensional pseudosection data in presence of a decrease in resistivity with depth. *European Journal of Environmental and Engineering geophysics*, **7**: 139-165.

Orellana, E. 1972. *Prospeccion geoeletrica em corrente continua*. Primeira edição. Madrid, Paraninfo, 523p.

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. *In: Conference SAGEEP*.

Ritzi, R. W., Andolsek, R. H. 1992. Relation between anisotropic transmissivity and azimuthal resistivity surveys in shallow fractured, carbonate flow systems. *Ground Water*, **30**: 774-780.

Roy, A., Apparao, A. 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, **36**(5): 329-340.

Sauck, W. A., Zabik, S. M. 1992. Azimuthal resistivity techniques and the directional variations of hydraulic conductivity in glacial sediments. *In: Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems: Soc. Eng. Min. Expl. Geophys.*, 197-222

Schettini, L. 2016. *Avaliação de aspectos geológicos e geotécnicos na implantação do Aterro Sanitário de São Carlos – SP, com o auxílio de geofísica*. Tese de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 188p.

Sheriff, E. R. 2013. *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. Fourth Edition. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists. 429p.

Steinich, B., Marin, L. E. 1997. Determination of flow characteristics in the aquifer of the northwestern peninsular of Yucatan, Mexico. *Journal of Hydrology*, **191**: 315-331.

Szalai, S., Novák, A., Szarka, L. 2007. Depth of investigation of Dipole-dipole, noncolinear and focused geoelectric arrays. *In: 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.

Taylor R. W. 1984. The determination of joint orientation and porosity from azimuthal resistivity measurements. *In: National Water Well Association Conference on the Application of Geophysics and Borehole Data to Hydrogeological Investigations*.

Taylor R. W., Fleming A. H. 1988. Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. *Ground Water*, **26**: 464-474.

Taylor, R., Jansen, J. 1996. Azimuthal resistivity techniques to delineate zones of high secondary porosity in fracture controlled aquifers. *In: Conference on Aquifer Restoration, Ground Water Monitoring and Geophysical Methods*, Vol. 1.

Watson K. A., Barker, R. D. 1999. Differentiating anisotropy and lateral effects using azimuthal resistivity offset Wenner soundings. *Geophysics*, **64**: 739-745.

Watson K. A., Barker, R. D. 2010. Tank modeling of azimuthal resistivity surveys over anisotropic bedrock with dipping overburden. *Near Surface Geophysics*, **8**: 297-309.

Wishart, D. N., Slater, L. D., Gates, A. E. 2006. Self potential improves characterization of hydraulically active fractures from azimuthal geoelectrical measurements. *Geophysical Research Letter*, **33**: 17314.

Zorzi, R. R. 2008. *Utilização de métodos geofísicos no monitoramento de barragens estudo de caso: usina hidrelétrica de Salto Caxias, em Capitão Leônidas Marques / PR*. Tese de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 84p.



## Apêndice I

Dados do levantamento obtidos na Etapa 1 para o arranjo Dipolo-dipolo

Dipolo-dipolo – Etapa 1							
a (m)	R (m)	Profundidade teórica (m)	Coordenadas resistividade aparente (X ; Y)	n	Resistividade medida (ohm . m)	Fator K	Resistividade aparente (ohm . m)
0,04	0,08	0,04	06 ; 0	1	972,1	0,75	732,9
			10 ; 0		1059		798,5
			14 ; 0		928,6		700,1
			18 ; 0		711,3		536,3
			22 ; 0		1063		801,7
			26 ; 0		1038		782,4
			30 ; 0		1028		775,1
			34 ; 0		836		630,5
			38 ; 0		900,8		679,2
			42 ; 0		951,7		717,6
			06 ; 12,5		949,7		716,1
			10 ; 12,5		1081,0		815,1
			14 ; 12,5		1108,0		835,4
			18 ; 12,5		836,6		630,8
			22 ; 12,5		929,6		700,9
			26 ; 12,5		952,6		718,3
			30 ; 12,5		1068,3		805,5
			34 ; 12,5		855,9		645,3
			38 ; 12,5		962,9		726,0
			42 ; 12,5		1036,0		781,1
			06 ; 25		961,7		725,1
			10 ; 25		884,4		666,8
			14 ; 25		937,2		706,6
			18 ; 25		789,6		595,3
			22 ; 25		1023,0		771,3
			26 ; 25		998,4		752,8
			30 ; 25		977,7		737,2
			34 ; 25		946,1		713,4
			38 ; 25		1046,7		789,2
			42 ; 25		918,4		692,4
a (m)	R (m)	Profundidade teórica (m)	Coordenadas resistividade aparente (X ; Y)	n	Resistividade medida (ohm . m)	Fator K	Resistividade aparente (ohm . m)
0,04	0,12	0,06	08 ; 0	2	349,6	3,02	1054
			12 ; 0		370,4		1117
			16 ; 0		317,3		957,1
			20 ; 0		321,4		969,4

			24 ; 0		392,0		1182
			28 ; 0		369,9		1116
			32 ; 0		337,7		1018
			36 ; 0		331,3		999,1
			40 ; 0		360,8		1088
			08 ; 12,5		380,9		1149
			12 ; 12,5		361,8		1091
			16 ; 12,5		328,3		990,1
			20 ; 12,5		306,8		925,3
			24 ; 12,5		367,3		1108
			28 ; 12,5		376,4		1135
			32 ; 12,5		354,4		1069
			36 ; 12,5		337,7		1018
			40 ; 12,5		413,8		1248
			08 ; 25		333,4		1005
			12 ; 25		347,4		1048
			16 ; 25		333,6		1006
			20 ; 25		317,7		958,3
			24 ; 25		378,6		1142
			28 ; 25		390,4		1178
			32 ; 25		384,9		1161
			36 ; 25		356,2		1074
			40 ; 25		374,7		1130
<b>a (m)</b>	<b>R (m)</b>	<b>Profundidade teórica (m)</b>	<b>Coordenadas resistividade aparente (X ; Y)</b>	<b>n</b>	<b>Resistividade medida (ohm . m)</b>	<b>Fator K</b>	<b>Resistividade aparente (ohm . m)</b>
0,04	0,16	0,08	10 ; 0	3	180,6	7,5	1362
			14 ; 0		177,5		1338
			18 ; 0		185,3		1397
			22 ; 0		167,9		1266
			26 ; 0		191,4		1443
			30 ; 0		165,4		1247
			34 ; 0		175,9		1326
			38 ; 0		180,3		1359
			10 ; 12,5		175,8		1326
			14 ; 12,5		160,7		1212
			18 ; 12,5		168,9		1273
			22 ; 12,5		173,4		1307
			26 ; 12,5		199,0		1501
			30 ; 12,5		173,4		1307
			34 ; 12,5		181,7		1370
			38 ; 12,5		190,6		1437
			10 ; 25		182,3		1374

			14 ; 25		166,8		1257
			18 ; 25		171,5		1293
			22 ; 25		154,7		1167
			26 ; 25		190,7		1438
			30 ; 25		189,5		1429
			34 ; 25		183,7		1385
			38 ; 25		173,1		1305
<b>a (m)</b>	<b>R (m)</b>	<b>Profundidade teórica (m)</b>	<b>Coordenadas resistividade aparente (X ; Y)</b>	<b>n</b>	<b>Resistividade medida (ohm . m)</b>	<b>Fator K</b>	<b>Resistividade aparente (ohm . m)</b>
0,04	0,2	0,1	12 ; 0	4	88,6	15,1	1337
			16 ; 0		111,9		1688
			20 ; 0		99,8		1504
			24 ; 0		90,6		1366
			28 ; 0		93,6		1411
			32 ; 0		93,2		1405
			36 ; 0		99,4		1499
			12 ; 12,5		97,8		1474
			16 ; 12,5		96,0		1447
			20 ; 12,5		107,4		1620
			24 ; 12,5		101,7		1534
			28 ; 12,5		107,8		1626
			32 ; 12,5		106,1		1599
			36 ; 12,5		113,1		1706
			12 ; 25		97,5		1470
			16 ; 25		99,5		1500
			20 ; 25		95,3		1437
			24 ; 25		87,7		1323
			28 ; 25		107,3		1618
			32 ; 25		107,4		1620
			36 ; 25		100,2		1510
<b>a (m)</b>	<b>R (m)</b>	<b>Profundidade teórica (m)</b>	<b>Coordenadas resistividade aparente (X ; Y)</b>	<b>n</b>	<b>Resistividade medida (ohm . m)</b>	<b>Fator K</b>	<b>Resistividade aparente (ohm . m)</b>
0,04	0,24	0,12	14 ; 0	5	63,8	26,4	1684
			18 ; 0		67,9		1793
			22 ; 0		61,2		1615
			26 ; 0		49,7		1311
			30 ; 0		57,3		1512
			34 ; 0		60,2		1589
			14 ; 12,5		63,4		1672
			16 ; 12,5		68,2		1801
			20 ; 12,5		71,7		1893
			26 ; 12,5		60,5		1596
			30 ; 12,5		69,2		1825

			34 ; 12,5		68,3		1802
			14 ; 25		62,5		1650
			18 ; 25		61,4		1620
			22 ; 25		59,3		1565
			26 ; 25		54,0		1426
			30 ; 25		64,3		1697
			34 ; 25		62,4		1646

## Apêndice II

Dados do levantamento obtidos na Etapa 2 para o arranjo Dipolo-dipolo

Dipolo-dipolo – Etapa 2							
a (m)	R (m)	Profundidade teórica (m)	Coordenadas resistividade aparente (X ; Y)	n	Resistividade medida (ohm . m)	Fator K	Resistividade aparente (ohm . m)
0,04	0,08	0,04	06 ; 0	1	699,6	0,75	528
			10 ; 0		664		501
			14 ; 0		701,5		529
			18 ; 0		598,5		451
			22 ; 0		700		528
			26 ; 0		613		462
			30 ; 0		818		617
			34 ; 0		683		515
			38 ; 0		801,8		605
			42 ; 0		787,3		594
			06 ; 12,5		706,1		532
			10 ; 12,5		733,6		553
			14 ; 12,5		775,5		585
			18 ; 12,5		629,1		474
			22 ; 12,5		676,5		510
			26 ; 12,5		616,0		464
			30 ; 12,5		747,7		564
			34 ; 12,5		742,5		560
			38 ; 12,5		768,2		579
			42 ; 12,5		785,0		592
			06 ; 25		763,9		576
			10 ; 25		739,9		558
			14 ; 25		790,5		596
			18 ; 25		652,2		492
			22 ; 25		673,3		508
			26 ; 25		707,5		533
			30 ; 25		782,6		590
			34 ; 25		723,3		545
			38 ; 25		794,5		599
			42 ; 25		778,5		587
a (m)	R (m)	Profundidade teórica (m)	Coordenadas resistividade aparente (X ; Y)	n	Resistividade medida (ohm . m)	Fator K	Resistividade aparente (ohm . m)
0,04	0,12	0,06	08 ; 0	2	277,2	3,02	836
			12 ; 0		292,3		881

			16 ; 0		271,6		819
			20 ; 0		205,2		619
			24 ; 0		245,7		741
			28 ; 0		218,6		659
			32 ; 0		297,9		898
			36 ; 0		273,0		823
			40 ; 0		292,0		881
			08 ; 12,5		283,5		855
			12 ; 12,5		329,8		995
			16 ; 12,5		266,3		803
			20 ; 12,5		211,2		637
			24 ; 12,5		235,8		711
			28 ; 12,5		230,2		694
			32 ; 12,5		301,8		910
			36 ; 12,5		284,4		858
			40 ; 12,5		299,9		905
			08 ; 25		270,5		816
			12 ; 25		331,5		1000
			16 ; 25		282,8		853
			20 ; 25		208,4		628
			24 ; 25		241,5		728
			28 ; 25		258,3		779
			32 ; 25		283,0		853
			36 ; 25		309,0		932
			40 ; 25		315,4		951
<b>a (m)</b>	<b>R (m)</b>	<b>Profundidade teórica (m)</b>	<b>Coordenadas resistividade aparente (X ; Y)</b>	<b>n</b>	<b>Resistividade medida (ohm . m)</b>	<b>Fator K</b>	<b>Resistividade aparente (ohm . m)</b>
0,04	0,16	0,08	10 ; 0	3	159,7	7,5	1204
			14 ; 0		150,0		1131
			18 ; 0		119,9		904
			22 ; 0		99,7		752
			26 ; 0		117,1		883
			30 ; 0		98,4		742
			34 ; 0		155,8		1174
			38 ; 0		134,0		1010
			10 ; 12,5		167,6		1263
			14 ; 12,5		157,4		1187
			18 ; 12,5		117,2		884
			22 ; 12,5		96,7		729
			26 ; 12,5		112,5		848
			30 ; 12,5		114,3		862
			34 ; 12,5		149,3		1126

			38 ; 12,5		152,5		1150
			10 ; 25		161,8		1220
			14 ; 25		153,0		1153
			18 ; 25		115,0		867
			22 ; 25		97,1		732
			26 ; 25		111,2		839
			30 ; 25		117,5		886
			34 ; 25		155,0		1168
			38 ; 25		165,0		1244
<b>a (m)</b>	<b>R (m)</b>	<b>Profundidade teórica (m)</b>	<b>Coordenadas resistividade aparente (X ; Y)</b>	<b>n</b>	<b>Resistividade medida (ohm . m)</b>	<b>Fator K</b>	<b>Resistividade aparente (ohm . m)</b>
0,04	0,2	0,1	12 ; 0	4	92,9	15,1	1400
			16 ; 0		72,3		1091
			20 ; 0		64,0		965
			24 ; 0		52,0		784
			28 ; 0		60,1		907
			32 ; 0		55,4		836
			36 ; 0		83,2		1254
			12 ; 12,5		97,9		1476
			16 ; 12,5		81,2		1224
			20 ; 12,5		62,8		947
			24 ; 12,5		56,8		856
			28 ; 12,5		65,4		986
			32 ; 12,5		58,9		888
			36 ; 12,5		89,9		1356
			12 ; 25		87,8		1324
			16 ; 25		72,8		1098
			20 ; 25		61,2		923
			24 ; 25		51,9		783
			28 ; 25		57,5		867
			32 ; 25		71,0		1071
			36 ; 25		91,7		1383
<b>a (m)</b>	<b>R (m)</b>	<b>Profundidade teórica (m)</b>	<b>Coordenadas resistividade aparente (X ; Y)</b>	<b>n</b>	<b>Resistividade medida (ohm . m)</b>	<b>Fator K</b>	<b>Resistividade aparente (ohm . m)</b>
0,04	0,24	0,12	14 ; 0	5	47,9	26,4	1264
			18 ; 0		41,7		1100
			22 ; 0		35,7		943
			26 ; 0		28,4		749
			30 ; 0		34,7		915
			34 ; 0		31,4		830
			14 ; 12,5		52,6		1388
			16 ; 12,5		45,7		1206
			20 ; 12,5		38,4		1014

			26 ; 12,5		32,3		853
			30 ; 12,5		40,7		1075
			34 ; 12,5		41,2		1086
			14 ; 25		43,0		1135
			18 ; 25		40,7		1075
			22 ; 25		35,4		934
			26 ; 25		27,9		737
			30 ; 25		37,4		986
			34 ; 25		43,0		1136

## Apêndice III

Dados do levantamento azimutal obtidos na Etapa 1 para o arranjo Dipolo-dipolo equatorial

Arranjo Dipolo-dipolo equatorial – Etapa 1					
Espaçamento(m)	b	Azimute (°)	Resistividade medida (ohm . m)	Fator k	Resistividade aparente (ohm. m)
0,03	0,15	0	38,8	48,53	1885
		15	39,8		1932
		30	38,5		1870
		45	38,3		1857
		60	47,4		2302
		75	62,6		3040
		90	61,9		3006
		105	60,9		2954
		120	51,1		2482
		135	49,4		2399
		150	51,7		2509
		165	46,6		2262
		180	38,8		1885
		195	39,8		1932
		210	38,5		1870
		225	38,3		1857
		240	47,4		2302
		255	62,6		3040
		270	61,9		3006
		285	60,9		2954
		300	51,1		2482
		315	49,4		2399
		330	51,7		2509
		345	46,6		2262
		360	38,8		1885

## Apêndice IV

Dados do levantamento azimutal obtidos na Etapa 2 para o arranjo Dipolo-dipolo equatorial

Arranjo Dipolo-dipolo equatorial – Etapa 2					
Espaçamento(m)	b	Azimute (°)	Resistividade medida (ohm . m)	Fator k	Resistividade aparente (Ohm. m)
0,03	0,15	0	23,7	48,53	1150
		15	23,2		1124
		30	24,3		1181
		45	26,1		1268
		60	30,1		1461
		75	42,0		2037
		90	48,0		2331
		105	14,0		679
		120	34,2		1660
		135	32,5		1579
		150	28,0		1359
		165	24,1		1171
		180	23,7		1150
		195	23,2		1124
		210	24,3		1181
		225	26,1		1268
		240	30,1		1461
		255	42,0		2037
		270	48,0		2331
		285	14,0		679
		300	34,2		1660
		315	32,5		1579
		330	28,0		1359
		345	24,1		1171
		360	23,7		1150

## Apêndice V

Dados do levantamento obtidos na Etapa 1 para o arranjo Gradiente

Gradiente – Etapa 1			
Coordenadas da resistividade aparente ( X ; Y)	Resistividade Medida (ohm . m)	Fator K	Resistividade aparente (ohm . m)
0,1875 ; 0,000	52,3	15,2	797
0,2025 ; 0,000	47,4	15,8	748
0,2175 ; 0,000	68,2	16,3	1108
0,2325 ; 0,000	49,1	16,6	815
0,2475 ; 0,000	63,2	16,8	1062
0,2625 ; 0,000	50,4	16,9	850
0,2775 ; 0,000	61,9	16,8	1037
0,2925 ; 0,000	71,3	16,5	1176
0,3075 ; 0,000	46,0	16,1	741
0,3225 ; 0,000	60,6	15,6	946
0,3375 ; 0,000	71,7	15,0	1079
0,1875 ; 0,015	54,6	13,8	752
0,2025 ; 0,015	52,9	14,4	763
0,2175 ; 0,015	66,9	15,0	1002
0,2325 ; 0,015	52,4	15,4	806
0,2475 ; 0,015	71,9	15,6	1123
0,2625 ; 0,015	58,8	15,7	922
0,2775 ; 0,015	62,7	15,6	976
0,2925 ; 0,015	52,7	15,3	804
0,3075 ; 0,015	72,1	14,8	1068
0,3225 ; 0,015	59,1	14,2	841
0,3375 ; 0,015	59,2	13,5	802
0,1875 ; 0,030	55,7	12,5	698
0,2025 ; 0,030	80,2	13,3	1064
0,2175 ; 0,030	57,4	13,9	797
0,2325 ; 0,030	56,3	14,4	808
0,2475 ; 0,030	72,3	14,6	1057
0,2625 ; 0,030	58,0	14,7	852
0,2775 ; 0,030	71,8	14,6	1045
0,2925 ; 0,030	54,1	14,2	769
0,3075 ; 0,030	69,5	13,7	952
0,3225 ; 0,030	65,6	13,0	855
0,3375 ; 0,030	87,3	12,3	1070
0,1875 ; 0,045	75,0	11,5	860
0,2025 ; 0,045	71,1	12,3	874
0,2175 ; 0,045	63,3	13,0	822

0,2325 ; 0,045	61,8	13,5	834
0,2475 ; 0,045	75,8	13,8	1046
0,2625 ; 0,045	64,3	13,9	892
0,2775 ; 0,045	73,6	13,7	1010
0,2925 ; 0,045	79,0	13,3	1054
0,3075 ; 0,045	63,2	12,8	807
0,3225 ; 0,045	66,2	12,0	797
0,3375 ; 0,045	90,2	11,2	1008
0,1875 ; 0,060	65,0	10,6	690
0,2025 ; 0,060	62,7	11,5	722
0,2175 ; 0,060	76,6	12,3	939
0,2325 ; 0,060	70,7	12,8	905
0,2475 ; 0,060	70,2	13,1	921
0,2625 ; 0,060	65,5	13,2	865
0,2775 ; 0,060	79,2	13,0	1033
0,2925 ; 0,060	63,8	12,6	807
0,3075 ; 0,060	85,7	12,0	1031
0,3225 ; 0,060	75,0	11,2	842
0,3375 ; 0,060	92,1	10,3	948
0,1875 ; 0,075	69,0	10,0	688
0,2025 ; 0,075	90,9	10,9	992
0,2175 ; 0,075	61,4	11,7	718
0,2325 ; 0,075	73,8	12,3	906
0,2475 ; 0,075	77,4	12,6	976
0,2625 ; 0,075	67,9	12,7	862
0,2775 ; 0,075	83,7	12,5	1049
0,2925 ; 0,075	67,3	12,1	814
0,3075 ; 0,075	92,4	11,5	1058
0,3225 ; 0,075	76,9	10,6	816
0,3375 ; 0,075	102,3	9,6	985
0,1875 ; 0,090	77,0	9,5	731
0,2025 ; 0,090	96,7	10,5	1013
0,2175 ; 0,090	64,7	11,3	731
0,2325 ; 0,090	68,1	11,9	810
0,2475 ; 0,090	86,6	12,3	1061
0,2625 ; 0,090	68,1	12,3	841
0,2775 ; 0,090	79,0	12,2	961
0,2925 ; 0,090	73,7	11,7	864
0,3075 ; 0,090	88,4	11,0	976
0,3225 ; 0,090	80,4	10,2	818
0,3375 ; 0,090	99,5	9,1	910
0,1875 ; 0,105	83,7	9,2	772
0,2025 ; 0,105	74,8	10,2	765

0,2175 ; 0,105	87,3	11,1	965
0,2325 ; 0,105	65,0	11,7	759
0,2475 ; 0,105	87,8	12,0	1057
0,2625 ; 0,105	69,1	12,1	838
0,2775 ; 0,105	77,2	11,9	922
0,2925 ; 0,105	100,8	11,5	1158
0,3075 ; 0,105	61,1	10,8	660
0,3225 ; 0,105	75,0	9,9	743
0,3375 ; 0,105	91,3	8,9	809
0,1875 ; 0,120	83,0	9,1	758
0,2025 ; 0,120	109,0	10,1	1105
0,2175 ; 0,120	68,8	11,0	755
0,2325 ; 0,120	71,2	11,6	826
0,2475 ; 0,120	92,1	12,0	1102
0,2625 ; 0,120	69,7	12,1	841
0,2775 ; 0,120	78,3	11,9	930
0,2925 ; 0,120	69,5	11,4	793
0,3075 ; 0,120	91,0	10,7	975
0,3225 ; 0,120	74,8	9,8	734
0,3375 ; 0,120	113,6	8,8	996
0,3375 ; 0,135	105,3	9,1	963
0,1875 ; 0,135	70,1	9,2	646
0,2025 ; 0,135	104,9	10,2	1072
0,2175 ; 0,135	75,0	11,1	829
0,2325 ; 0,135	59,9	11,7	699
0,2475 ; 0,135	91,4	12,0	1100
0,2625 ; 0,135	65,9	12,1	799
0,2775 ; 0,135	74,5	11,9	890
0,2925 ; 0,135	97,1	11,5	1116
0,3075 ; 0,135	70,5	10,8	761
0,3225 ; 0,135	73,6	9,9	729
0,3375 ; 0,135	110,6	8,9	980
0,1875 ; 0,150	75,6	9,5	718
0,2025 ; 0,150	97,8	10,5	1025
0,2175 ; 0,150	75,7	11,3	855
0,2325 ; 0,150	66,7	11,9	793
0,2475 ; 0,150	91,7	12,3	1124
0,2625 ; 0,150	70,4	12,3	869
0,2775 ; 0,150	72,8	12,2	885
0,2925 ; 0,150	97,4	11,7	1141
0,3075 ; 0,150	71,2	11,0	786
0,3225 ; 0,150	72,7	10,2	739
0,1875 ; 0,165	72,7	10,0	724
0,2025 ; 0,165	103,8	10,9	1132
0,2175 ; 0,165	58,0	11,7	678

0,2325 ; 0,165	68,8	12,3	844
0,2475 ; 0,165	88,0	12,6	1110
0,2625 ; 0,165	73,0	12,7	927
0,2775 ; 0,165	74,3	12,5	931
0,2925 ; 0,165	99,3	12,1	1202
0,3075 ; 0,165	63,0	11,5	721
0,3225 ; 0,165	70,6	10,6	749
0,3375 ; 0,165	111,4	9,6	1072
0,1875 ; 0,180	58,3	10,6	619
0,2025 ; 0,180	102,1	11,5	1175
0,2175 ; 0,180	65,4	12,3	801
0,2325 ; 0,180	90,0	12,8	1152
0,2475 ; 0,180	62,5	13,1	820
0,2625 ; 0,180	68,3	13,2	902
0,2775 ; 0,180	74,5	13,0	972
0,2925 ; 0,180	93,1	12,6	1177
0,3075 ; 0,180	59,7	12,0	718
0,3225 ; 0,180	74,2	11,2	833
0,3375 ; 0,180	99,9	10,3	1029
0,1875 ; 0,195	69,5	11,5	797
0,2025 ; 0,195	94,7	12,3	1165
0,2175 ; 0,195	62,9	13,0	817
0,2325 ; 0,195	62,5	13,5	843
0,2475 ; 0,195	79,9	13,8	1102
0,2625 ; 0,195	66,8	13,9	927
0,2775 ; 0,195	64,9	13,7	890
0,2925 ; 0,195	92,9	13,3	1240
0,3075 ; 0,195	59,8	12,8	764
0,3225 ; 0,195	64,2	12,0	773
0,3375 ; 0,195	95,3	11,2	1065
0,1875 ; 0,210	52,3	12,5	655
0,2025 ; 0,210	96,7	13,3	1283
0,2175 ; 0,210	62,1	13,9	863
0,2325 ; 0,210	62,0	14,4	890
0,2475 ; 0,210	83,4	14,6	1220
0,2625 ; 0,210	65,0	14,7	955
0,2775 ; 0,210	67,0	14,6	975
0,2925 ; 0,210	86,2	14,2	1225
0,3075 ; 0,210	55,0	13,7	753
0,3225 ; 0,210	65,7	13,0	856
0,3375 ; 0,210	95,2	12,3	1166
0,1875 ; 0,225	53,2	13,8	733
0,2025 ; 0,225	90,7	14,4	1309

0,2175 ; 0,225	63,8	15,0	956
0,2325 ; 0,225	80,1	15,4	1232
0,2475 ; 0,225	58,1	15,6	908
0,2625 ; 0,225	57,1	15,7	896
0,2775 ; 0,225	65,8	15,6	1024
0,2925 ; 0,225	80,4	15,3	1227
0,3075 ; 0,225	58,4	14,8	865
0,3225 ; 0,225	56,9	14,2	809
0,3375 ; 0,225	90,8	13,5	1230
0,1875 ; 0,240	48,8	15,2	744
0,2025 ; 0,240	78,6	15,8	1241
0,2175 ; 0,240	58,9	16,3	957
0,2325 ; 0,240	52,0	16,6	863
0,2475 ; 0,240	80,5	16,8	1353
0,2625 ; 0,240	45,2	16,9	762
0,2775 ; 0,240	64,5	16,8	1081
0,2925 ; 0,240	58,3	16,5	962
0,3075 ; 0,240	76,7	16,1	1236
0,3225 ; 0,240	55,8	15,6	871
0,3375 ; 0,240	84,3	15,0	1269

## Apêndice VI

Dados do levantamento obtidos na Etapa 2 para o arranjo Gradiente

Gradiente (com abertura)			
Coordenadas da resistividade aparente ( X ; Y)	Resistividade Medida (ohm . m)	Fator K	Resistividade aparente (ohm . m)
0,1875 ; 0,000	62,6	15,2	729
0,2025 ; 0,000	90,5	15,8	1092
0,2175 ; 0,000	136,3	16,3	1694
0,2325 ; 0,000	111,3	16,6	1413
0,2475 ; 0,000	166,8	16,8	2144
0,2625 ; 0,000	125,6	16,9	1619
0,2775 ; 0,000	161,8	16,8	2073
0,2925 ; 0,000	187,7	16,5	2368
0,3075 ; 0,000	127,7	16,1	1574
0,3225 ; 0,000	163,6	15,6	1954
0,3375 ; 0,000	161,2	15,0	1856
0,1875 ; 0,015	84,6	13,8	891
0,2025 ; 0,015	81,2	14,4	896
0,2175 ; 0,015	168,5	15,0	1929
0,2325 ; 0,015	125,9	15,4	1481
0,2475 ; 0,015	207,7	15,6	2482
0,2625 ; 0,015	161,3	15,7	1935
0,2775 ; 0,015	192,1	15,6	2287
0,2925 ; 0,015	151,9	15,3	1774
0,3075 ; 0,015	222,9	14,8	2524
0,3225 ; 0,015	181,3	14,2	1972
0,3375 ; 0,015	144,3	13,5	1495
0,1875 ; 0,030	74,5	12,5	713
0,2025 ; 0,030	190,8	13,3	1936
0,2175 ; 0,030	139,7	13,9	1484
0,2325 ; 0,030	163,4	14,4	1793
0,2475 ; 0,030	250,0	14,6	2796
0,2625 ; 0,030	187,4	14,7	2106
0,2775 ; 0,030	218,2	14,6	2428
0,2925 ; 0,030	170,8	14,2	1857
0,3075 ; 0,030	233,9	13,7	2451
0,3225 ; 0,030	216,3	13,0	2155
0,3375 ; 0,030	252,5	12,3	2366
0,1875 ; 0,045	148,0	11,5	1298
0,2025 ; 0,045	216,0	12,3	2031

0,2175 ; 0,045	241,1	13,0	2394
0,2325 ; 0,045	221,7	13,5	2287
0,2475 ; 0,045	290,3	13,8	3062
0,2625 ; 0,045	214,4	13,9	2274
0,2775 ; 0,045	246,6	13,7	2587
0,2925 ; 0,045	260,5	13,3	2658
0,3075 ; 0,045	232,2	12,8	2268
0,3225 ; 0,045	232,2	12,0	2137
0,3375 ; 0,045	295,8	11,2	2527
0,1875 ; 0,060	220,6	10,6	1792
0,2025 ; 0,060	265,8	11,5	2340
0,2175 ; 0,060	332,6	12,3	3116
0,2325 ; 0,060	335,8	12,8	3287
0,2475 ; 0,060	315,6	13,1	3168
0,2625 ; 0,060	256,4	13,2	2590
0,2775 ; 0,060	305,6	13,0	3048
0,2925 ; 0,060	226,0	12,6	2185
0,3075 ; 0,060	343,9	12,0	3162
0,3225 ; 0,060	293,4	11,2	2519
0,3375 ; 0,060	354,0	10,3	2788
0,1875 ; 0,075	287,0	10,0	2187
0,2025 ; 0,075	555,0	10,9	4629
0,2175 ; 0,075	322,6	11,7	2884
0,2325 ; 0,075	417,6	12,3	3918
0,2475 ; 0,075	386,0	12,6	3723
0,2625 ; 0,075	286,2	12,7	2780
0,2775 ; 0,075	340,0	12,5	3257
0,2925 ; 0,075	214,9	12,1	1989
0,3075 ; 0,075	403,0	11,5	3529
0,3225 ; 0,075	320,7	10,6	2602
0,3375 ; 0,075	437,0	9,6	3216
0,1875 ; 0,090	833,4	9,5	4588
0,2025 ; 0,090	846,6	10,5	5200
0,2175 ; 0,090	438,4	11,3	3786
0,2325 ; 0,090	403,3	11,9	3669
0,2475 ; 0,090	462,4	12,3	4332
0,2625 ; 0,090	294,3	12,3	2778
0,2775 ; 0,090	328,5	12,2	3055
0,2925 ; 0,090	260,3	11,7	2333
0,3075 ; 0,090	417,8	11,0	3528
0,3225 ; 0,090	351,2	10,2	2731
0,3375 ; 0,090	511,0	9,1	3574
0,1875 ; 0,105	1485,7	9,2	5200
0,2025 ; 0,105	662,3	10,2	4588
0,2175 ; 0,105	782,5	11,1	4971

0,2325 ; 0,105	497,3	11,7	4439
0,2475 ; 0,105	486,6	12,0	4479
0,2625 ; 0,105	323,1	12,1	2997
0,2775 ; 0,105	350,2	11,9	3199
0,2925 ; 0,105	382,7	11,5	3363
0,3075 ; 0,105	298,6	10,8	2465
0,3225 ; 0,105	400,3	9,9	3032
0,3375 ; 0,105	417,1	8,9	2826
0,1875 ; 0,120	927,6	9,1	4588
0,2025 ; 0,120	915,5	10,1	5200
0,2175 ; 0,120	477,9	11,0	4011
0,2325 ; 0,120	408,1	11,6	3619
0,2475 ; 0,120	478,7	12,0	4380
0,2625 ; 0,120	295,5	12,1	2725
0,2775 ; 0,120	336,8	11,9	3058
0,2925 ; 0,120	279,2	11,4	2437
0,3075 ; 0,120	436,7	10,7	3579
0,3225 ; 0,120	367,6	9,8	2760
0,3375 ; 0,120	603,0	8,8	4042
0,3375 ; 0,135	415,5	9,1	2906
0,1875 ; 0,135	376,0	9,2	2652
0,2025 ; 0,135	576,7	10,2	4508
0,2175 ; 0,135	436,9	11,1	3693
0,2325 ; 0,135	305,7	11,7	2728
0,2475 ; 0,135	400,0	12,0	3682
0,2625 ; 0,135	317,7	12,1	2947
0,2775 ; 0,135	293,4	11,9	2680
0,2925 ; 0,135	355,7	11,5	3126
0,3075 ; 0,135	303,0	10,8	2502
0,3225 ; 0,135	334,2	9,9	2532
0,3375 ; 0,135	505,6	8,9	3425
0,1875 ; 0,150	261,1	9,5	1897
0,2025 ; 0,150	347,4	10,5	2784
0,2175 ; 0,150	305,2	11,3	2636
0,2325 ; 0,150	285,4	11,9	2596
0,2475 ; 0,150	351,4	12,3	3293
0,2625 ; 0,150	264,5	12,3	2496
0,2775 ; 0,150	280,5	12,2	2609
0,2925 ; 0,150	335,3	11,7	3005
0,3075 ; 0,150	255,9	11,0	2161
0,3225 ; 0,150	280,3	10,2	2179
0,1875 ; 0,165	147,0	10,0	1120
0,2025 ; 0,165	233,2	10,9	1945

0,2175 ; 0,165	227,8	11,7	2036
0,2325 ; 0,165	238,5	12,3	2238
0,2475 ; 0,165	296,4	12,6	2859
0,2625 ; 0,165	239,4	12,7	2326
0,2775 ; 0,165	261,1	12,5	2501
0,2925 ; 0,165	294,2	12,1	2722
0,3075 ; 0,165	225,3	11,5	1972
0,3225 ; 0,165	256,3	10,6	2079
0,3375 ; 0,165	352,6	9,6	2595
0,1875 ; 0,180	126,9	10,6	1031
0,2025 ; 0,180	159,2	11,5	1401
0,2175 ; 0,180	176,0	12,3	1649
0,2325 ; 0,180	259,5	12,8	2540
0,2475 ; 0,180	188,7	13,1	1894
0,2625 ; 0,180	204,2	13,2	2063
0,2775 ; 0,180	246,4	13,0	2457
0,2925 ; 0,180	262,5	12,6	2538
0,3075 ; 0,180	185,1	12,0	1702
0,3225 ; 0,180	224,6	11,2	1929
0,3375 ; 0,180	268,6	10,3	2115
0,1875 ; 0,195	90,5	11,5	794
0,2025 ; 0,195	138,0	12,3	1298
0,2175 ; 0,195	132,0	13,0	1310
0,2325 ; 0,195	142,4	13,5	1469
0,2475 ; 0,195	242,3	13,8	2556
0,2625 ; 0,195	191,1	13,9	2027
0,2775 ; 0,195	188,8	13,7	1981
0,2925 ; 0,195	249,0	13,3	2541
0,3075 ; 0,195	157,2	12,8	1535
0,3225 ; 0,195	167,1	12,0	1538
0,3375 ; 0,195	224,0	11,2	1914
0,1875 ; 0,210	50,9	12,5	487
0,2025 ; 0,210	105,9	13,3	1075
0,2175 ; 0,210	99,7	13,9	1059
0,2325 ; 0,210	108,0	14,4	1185
0,2475 ; 0,210	219,9	14,6	2459
0,2625 ; 0,210	159,3	14,7	1790
0,2775 ; 0,210	165,3	14,6	1840
0,2925 ; 0,210	196,6	14,2	2137
0,3075 ; 0,210	141,4	13,7	1481
0,3225 ; 0,210	155,8	13,0	1553
0,3375 ; 0,210	200,6	12,3	1879
0,1875 ; 0,225	55,5	13,8	584
0,2025 ; 0,225	76,3	14,4	842
0,2175 ; 0,225	95,0	15,0	1088

0,2325 ; 0,225	147,1	15,4	1730
0,2475 ; 0,225	128,0	15,6	1529
0,2625 ; 0,225	127,9	15,7	1534
0,2775 ; 0,225	140,7	15,6	1675
0,2925 ; 0,225	159,0	15,3	1856
0,3075 ; 0,225	129,4	14,8	1465
0,3225 ; 0,225	122,4	14,2	1332
0,3375 ; 0,225	165,8	13,5	1717
0,1875 ; 0,240	25,5	15,2	297
0,2025 ; 0,240	72,4	15,8	875
0,2175 ; 0,240	81,5	16,3	1013
0,2325 ; 0,240	74,5	16,6	946
0,2475 ; 0,240	157,9	16,8	2029
0,2625 ; 0,240	99,2	16,9	1279
0,2775 ; 0,240	116,7	16,8	1495
0,2925 ; 0,240	112,3	16,5	1416
0,3075 ; 0,240	138,3	16,1	1704
0,3225 ; 0,240	104,1	15,6	1244
0,3375 ; 0,240	142,0	15,0	1634

## Apêndice VII

Dados do levantamento azimutal obtidos na Etapa 1 para o arranjo Quadrático

Arranjo Quadrático – Etapa 1				
Espaçamento(m)	Azimute (°)	Resistividade medida (ohm. m)	Fator K	Resistividade aparente (ohm. m)
0,10	0	1053	1,07	1129
	15	1015		1088
	30	1038		1114
	45	1072		1149
	60	1139		1222
	75	1181		1266
	90	1477		1584
	105	1475		1582
	120	1478		1585
	135	1451		1556
	150	1340		1437
	165	1272		1364
	180	1053		1129
	195	1015		1088
	210	1038		1114
	225	1072		1149
	240	1139		1222
	255	1181		1266
	270	1477		1584
	285	1475		1582
	300	1478		1585
	315	1451		1556
	330	1340		1437
	345	1272		1364
	360	1053		1129

## Apêndice VIII

Dados do levantamento azimutal obtidos na Etapa 2 para o arranjo Quadrático

Arranjo Quadrático – Etapa 2				
Espaçamento(m)	Azimute (°)	Resistividade medida (ohm. m)	Fator K	Resistividade aparente (ohm. m)
0,10	0	593	1,07	636
	15	618		663
	30	616		661
	45	666		715
	60	745		800
	75	816		875
	90	1034		1109
	105	950		1019
	120	926		993
	135	854		916
	150	746		800
	165	711		762
	180	593		636
	195	618		663
	210	616		661
	225	666		715
	240	745		800
	255	816		875
	270	1034		1109
	285	950		1019
	300	926		993
	315	854		916
	330	746		800
	345	711		762
	360	593		636

## Apêndice IX

Dados do levantamento azimutal obtidos na Etapa 1 para o arranjo Wenner

Arranjo Wenner – Etapa 1				
Espaçamento(m)	Azimute (°)	Resistividade medida (ohm. m)	Fator K	Resistividade aparente (ohm. m)
0,09	0	1529	0,57	864
	15	1572		889
	30	1574		890
	45	1549		876
	60	1500		848
	75	1408		796
	90	1412		799
	105	1475		834
	120	1514		856
	135	1514		856
	150	1469		831
	165	1475		834
	180	1529		864
	195	1572		889
	210	1574		890
	225	1549		876
	240	1500		848
	255	1408		796
	270	1412		799
	285	1475		834
	300	1514		856
	315	1514		856
	330	1469		831
	345	1475		834
	360	1529		864

## Apêndice X

Dados do levantamento azimutal obtidos na Etapa 2 para o arranjo Wenner

Arranjo Wenner – Etapa 2				
Espaçamento(m)	Azimute (°)	Resistividade medida (ohm. m)	Fator K	Resistividade aparente (ohm. m)
0,09	0	1349	0,57	762,7
	15	1404		793,9
	30	1473		833,2
	45	1526		862,9
	60	1583		895,4
	75	1667		942,9
	90	1792		1013,2
	105	1741		984,7
	120	1335		754,7
	135	1686		953,2
	150	1598		903,8
	165	1396		789,6
	180	1349		762,7
	195	1404		793,9
	210	1473		833,2
	225	1526		862,9
	240	1583		895,4
	255	1667		942,9
	270	1792		1013,2
	285	1741		984,7
	300	1335		754,7
	315	1686		953,2
	330	1598		903,8
	345	1396		789,6
	360	1349		762,7