



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

# VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE DA GEOFÍSICA ELÉTRICA NA ENGENHARIA GEOTÉCNICA

CARLOS MAGNUM RIBEIRO BENEVIDES

SALVADOR – BAHIA  
DEZEMBRO – 2014

Verificação da Aplicabilidade da Geofísica Elétrica na Engenharia Geotécnica

por

CARLOS MAGNUM RIBEIRO BENEVIDES

Orientadora: Profa. Dra. Susana Silva Cavalcanti

Co-orientador: Bcl. Italo Campelo de Souza

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora

Susana Cavalcanti

Prof. Dra. Susana Silva Cavalcanti - Orientadora

Alberto Brum Novaes

Prof. Dr. Alberto Brum Novaes

Kátia Rejane F. do Nascimento

Dra. Kátia Rejane Freitas do Nascimento

Data da aprovação: 22/12/2014

Dedico este trabalho primeiramente  
a Deus e a toda a minha família.

# RESUMO

O objetivo deste trabalho é demonstrar, através da utilização de dados sintéticos gerados no programa RES2DMOD da Geotomo Software, que a Geofísica pode ser de grande utilidade para auxiliar obras de engenharia, podendo reduzir os custos destas obras. Buscamos reproduzir situações que surgem como problemas para a construção civil e obras especiais, que para serem descobertos se faria necessária a utilização de sondas ou que poderiam gerar imprevistos e contratemplos para as pessoas que fizessem uso das instalações no futuro. Para tal avaliação utilizamos o método geofísico da eletrorresistividade, para identificar zonas com presença de matacões, de falhas ou de cavernas cársticas em subsuperfície. Foi utilizado no processo o programa RES2DINV da Geotomo Software a fim de fazer a inversão dos dados.

# ABSTRACT

This work's objective is show, using synthetic data generated on the Geotomo Software's RES2DMOD, that geophysics can help engineering's works reducing their spents. We've tried to reproduce some recurring problems to the industries, which would be very difficult to be uncovered and would be necessary to do some well loggings, which would make the work more expensive or it could become a big problem to the people that will use the builldings in the future. To make these studies, were used the eletroresistivity method, to identify the presence of boulders, faults and how the water level varies in the karst caves. The Geotomo Software's RES2DINV were also used to do the geophysical inversion of the data.

# ÍNDICE

RESUMO . . . . .	iii
ABSTRACT . . . . .	iv
ÍNDICE . . . . .	v
ÍNDICE DE FIGURAS . . . . .	vii
INTRODUÇÃO . . . . .	1
<b>CAPÍTULO 1 Bases Teóricas da Modelagem Geométrica . . . . .</b>	<b>2</b>
1.1 Propriedades Elétricas . . . . .	2
1.2 O Método da Eletroresistividade . . . . .	3
1.2.1 Potencial Elétrico num Meio Homogêneo . . . . .	3
1.2.2 Técnicas . . . . .	4
1.2.3 Arranjo de Eletrodos . . . . .	5
<b>CAPÍTULO 2 Modelagem e Inversão Geométrica Bidimensional . . . . .</b>	<b>7</b>
2.1 Blocos de Rocha ou Matacões . . . . .	7
2.1.1 Descrição Geológica . . . . .	7
2.1.2 Modelo Geométrico e Elétrico . . . . .	8
2.2 Falhamentos e Estruturas de Deformação . . . . .	8
2.2.1 Descrição Geológica . . . . .	8
2.2.2 Modelo Geométrico e Elétrico . . . . .	11
2.3 Cavernas Cársticas Subterrâneas . . . . .	13
2.3.1 Descrição Geológica . . . . .	13
2.3.2 Buraco de Cajamar . . . . .	13
2.3.3 Modelo Geométrico . . . . .	14
2.4 RES2DMOD . . . . .	15
2.5 RES2DINV . . . . .	15
<b>CAPÍTULO 3 Resultados . . . . .</b>	<b>17</b>
3.1 Blocos de Rocha ou Matacões . . . . .	17
3.2 Falha Inclinada com Zonas de Bandeamento . . . . .	19
3.2.1 Falha Inclinada Aflorante com Zonas de Bandeamento . . . . .	19
3.2.2 Falha Inclinada com Zonas de Bandeamento e cobertura mais resistiva . . . . .	22

3.2.3	Falha Inclinada com Zonas de Bandeamento e cobertura menos resistiva	24
3.3	Cavernas Cársticas . . . . .	26
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>32</b>
	<b>Agradecimentos . . . . .</b>	<b>34</b>
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>35</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Arranjos dos tipos dipolo-dipolo(a) e Schlumberger(b). . . . .	6
2.1	Exemplo de problema gerado pela presença de um matacão não-mapeado previamente utilizando geofísica. (Fonte: <a href="http://www.altaresolucao.com.br">www.altaresolucao.com.br</a> ) . . . . .	8
2.2	Exemplo de problema gerado pela presença de uma falha não-mapeada previamente utilizando geofísica ocorrido em Salvador-Bahia. (Fonte: Informativo do Serviço Geológico do Brasil - CPRM - MME/SGM - Ano 4 - N° 16 - Edição de junho de 2007) . . . . .	9
2.3	Desenvolvimento de uma zona de danos numa falha normal. (Fonte: Souza, 2013) . . . . .	10
2.4	Representação da zona central com 200 bandas de deformação por metro, sendo que cada banda possui 2 mm de largura, totalizando em 0,4 m de rocha deformada com 5% de porosidade. (Fonte: Souza, 2013) . . . . .	12
2.5	Exemplo de problema gerado pelo não-mapeamento correto de uma caverna cárstica ocorrido em Cajamar-São Paulo. (Fonte: <a href="http://www.ebanataw.com.br/roberto/pericias/CasoCajamar.html">www.ebanataw.com.br/roberto/pericias/CasoCajamar.html</a> ) . . . . .	14
2.6	Malha de blocos retangulares utilizada no programa RES2DMOD. . . . .	15
3.1	Modelo Geológico de uma região com presença de matacões em subsuperfície. . . . .	17
3.2	Pseudo-seção de resistividade aparente de blocos de rocha em subsuperfície usando o arranjo dipolo-dipolo. . . . .	18
3.3	Pseudo-seção de resistividade aparente de blocos de rocha em subsuperfície usando o arranjo Schlumberger. . . . .	18
3.4	Inversão do modelo de blocos de rocha em subsuperfície utilizando arranjo dipolo-dipolo. . . . .	19
3.5	Inversão do modelo de blocos de rocha em subsuperfície utilizando arranjo Schlumberger. . . . .	19
3.6	Modelo geológico de uma falha inclinada aflorante. . . . .	20
3.7	Pseudo-seção de resistividade aparente de uma falha inclinada aflorante utilizando o arranjo dipolo-dipolo. . . . .	20
3.8	Pseudo-seção de resistividade aparente de uma falha inclinada aflorante utilizando o arranjo Schlumberger. . . . .	21
3.9	Inversão do modelo de uma falha inclinada aflorante utilizando arranjo dipolo-dipolo. . . . .	21

3.10	Inversão do modelo de uma falha inclinada aflorante utilizando arranjo Schlumberger. . . . .	22
3.11	Modelo geológico de uma falha inclinada com cobertura mais resistiva. . . . .	22
3.12	Pseudo-seção de resistividade aparente de uma falha inclinada com cobertura mais resistiva usando o arranjo dipolo-dipolo. . . . .	23
3.13	Pseudo-seção de resistividade aparente de uma falha inclinada com cobertura mais resistiva usando o arranjo Schlumberger. . . . .	23
3.14	Inversão do modelo de uma falha inclinada com cobertura mais resistiva utilizando arranjo dipolo-dipolo. . . . .	23
3.15	Inversão do modelo de uma falha inclinada aflorante com cobertura mais resistiva arranjo Schlumberger. . . . .	24
3.16	Modelo geológico de uma falha inclinada com cobertura menos resistiva. . . . .	24
3.17	Pseudo-seção de resistividade aparente de uma falha inclinada com cobertura menos resistiva usando o arranjo dipolo-dipolo. . . . .	25
3.18	Pseudo-seção de resistividade aparente de uma falha inclinada com cobertura menos resistiva usando o arranjo Schlumberger. . . . .	25
3.19	Inversão do modelo de uma falha inclinada com cobertura menos resistiva utilizando arranjo dipolo-dipolo. . . . .	26
3.20	Inversão do modelo de uma falha inclinada com cobertura menos resistiva utilizando arranjo Schlumberger. . . . .	26
3.21	Modelo geológico de uma caverna cárstica preenchida com água subsuperfície. . . . .	27
3.22	Modelo geológico de uma caverna cárstica preenchida com água e ar em subsuperfície. . . . .	27
3.23	Pseudo-seção de resistividade aparente de uma região que contém uma caverna cárstica preenchida com água em subsuperfície usando o arranjo dipolo-dipolo. . . . .	28
3.24	Pseudo-seção de resistividade aparente de uma região que contém uma caverna cárstica preenchida com água em subsuperfície usando o arranjo Schlumberger. . . . .	28
3.25	Pseudo-seção de resistividade aparente de uma região que contém uma caverna cárstica preenchida com água e ar em subsuperfície usando o arranjo dipolo-dipolo. . . . .	29
3.26	Pseudo-seção de resistividade aparente de uma região que contém uma caverna cárstica preenchida com água e ar em subsuperfície usando o arranjo Schlumberger. . . . .	29
3.27	Dado invertido de modelo de uma caverna cárstica preenchida com água em subsuperfície utilizando o arranjo dipolo-dipolo. . . . .	30
3.28	Dado invertido de modelo de uma caverna cárstica preenchida com água em subsuperfície utilizando o arranjo Schlumberger. . . . .	30
3.29	Dado invertido de modelo de uma caverna cárstica preenchida com água e ar em subsuperfície utilizando o arranjo dipolo-dipolo. . . . .	31

3.30 Dado invertido de modelo de uma caverna cárstica preenchida com água e ar em subsuperfície utilizando o arranjo Schlumberger. . . . . 31

# INTRODUÇÃO

A área de construção civil cada dia que passa se expande mais e, conseqüentemente, áreas de difícil acesso, com condições geológicas complexas e geotecnicamente improváveis de serem exploradas começam a ser vistas como áreas de bom potencial para construção civil. Neste cenário é que cresce a necessidade de métodos que possam explorar esses locais de maneira que nos deixe claro o que existe em subsuperfície e que seja economicamente viável.

Uma das áreas geofísicas de maior potencial não explorado é a Geofísica aplicada à Engenharia Geotécnica, que apesar de apresentar resultados muito bons e um custo inferior a correção outros problemas que podem surgir devido a não-utilização destas técnicas, ainda enfrenta uma grande resistência dos empresários do ramo da Engenharia, não sendo tão utilizada como poderia e deveria ser. A Geofísica tem diversos métodos que podem ser utilizados como ferramenta de auxílio à Engenharia, como os métodos sísmicos, radiométricos, elétricos e potenciais, cada um com uma utilidade diferente e uma área da Engenharia em que podem ser aplicados.

Os métodos elétricos se mostram excelentes opções devido a serem métodos não invasivos que fazem aquilo a que se propõem de modo bastante satisfatório e por possuírem baixos custos econômicos. Dentro dos métodos elétricos existem várias técnicas e arranjos diferentes que podem ser utilizados. Na engenharia os principais métodos elétricos utilizados são o da eletrorresistividade (ER), a Polarização Induzida Espectral (SIP) e o do Potencial Espontâneo (SP). A Eletrorresistividade tem como principal característica a possibilidade de diferenciação de camadas horizontais, falhas, fraturas. Enquanto isso o Potencial Espontâneo e o SIP se caracterizam pela identificação de áreas onde podem haver vazamentos de fluidos, pois é capaz de mapear o fluxo destes fluidos.

# CAPÍTULO 1

## Bases Teóricas da Modelagem Geoelétrica

Neste capítulo serão mostradas as bases teóricas da geofísica com fins de fazer uma modelagem de estruturas geológicas. Esta teoria consiste em mostrar as propriedades elétricas e as aplicações destas nos respectivos métodos elétricos.

### 1.1 Propriedades Elétricas

Eletricamente, podemos definir as rochas como agregados heterogêneos de grãos ou cristais de materiais isolantes ou condutores, contendo frações variáveis de eletrólitos aquosos. As propriedades destes agregados dependem da composição e da textura da matriz de sólidos, da geometria de seus espaço-de-poros e da proporção de água nesses vazios. Como o método empregado neste trabalho foi o geoelétrico, falaremos apenas sobre as propriedades elétricas.

As principais propriedades elétricas utilizadas na Geofísica são a condutividade elétrica, a permissividade dielétrica e a cargabilidade elétrica. A condutividade elétrica expressa a liberdade com que um certo material transporta cargas livres em seu interior sob ação de um campo elétrico. A condutividade elétrica das rochas depende da composição mineralógica, da sua porosidade e da quantidade e salinidade das águas que preenchem estes poros.

A corrente elétrica propaga-se nos materiais através de três processos distintos: transporte eletrônico (ôhmico), eletrolítico e dielétrico. O primeiro é típico de materiais que contém elétrons livres, como os minerais metálicos. Na condução eletrolítica, a corrente é transportada pelos íons e o fluxo de corrente é relativamente mais baixo comparado ao caso anterior. A condução dielétrica ocorre em materiais isolantes (corrente de polarização ou de deslocamento)(Telford e Sheriff, 1990).

Archie (1942), através de vários dados experimentais com arenitos limpos (sem lama), desenvolveu uma relação empírica para expressar a influência da porosidade sobre a resistividade de uma rocha:

$$\rho_o = \rho_w \phi^{-m} S_w^{-n}, \quad (1.1)$$

sendo,

- $\rho_o$  a resistividade resultante;
- $\rho_w$  a resistividade do fluido;
- $\phi$  a porosidade da rocha;
- $S$  a saturação de fluido na rocha;
- e  $m$  e  $n$  constantes.

## 1.2 O Método da Eletroresistividade

No método da Eletroresistividade, correntes elétricas artificialmente geradas são introduzidas no solo com auxílio de eletrodos de corrente e as diferenças de potencial são medidas entre dois eletrodos de potencial instalados na superfície. Valores de de diferença de potencial detectados fora dos padrões esperados para solo homogêneo nos fornecem informações quanto a forma e as propriedades elétricas das heterogeneidades de subsuperfície.

### 1.2.1 Potencial Elétrico num Meio Homogêneo

Considere um semi-espaco homogêneo e isotrópico, de condutividade  $\sigma$ , onde se estabelece um fluxo de corrente contínua. Se  $\delta\mathbf{A}$  é um elemento de superfície nesse semi-espaco e  $\mathbf{J}$  a densidade de corrente nele, a corrente que passa através de  $\delta\mathbf{A}$  será  $\mathbf{J} \cdot \delta\mathbf{A}$ .

Em condições estacionárias, a equação de Maxwell para o campo elétrico e a equação da conservação de carga elétrica se reduzem, respectivamente, a:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (1.3)$$

sendo  $\mathbf{E}$  a intensidade do campo elétrico (V/m), e  $\mathbf{J}$  a densidade de corrente elétrica (A/m<sup>2</sup>).

Assim,  $\mathbf{E}$  é um campo conservativo que pode ser derivado de um potencial elétrico,  $V$  como:

$$\mathbf{E} = -\nabla V. \quad (1.4)$$

Em meios isotrópicos e lineares a densidade de corrente elétrica se relaciona ao campo elétrico pela Lei de Ohm,

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (1.5)$$

sendo  $\sigma$  a condutividade elétrica do semi-espaço.

Desse modo, substituindo a equação (1.4) na equação (1.5) e na (1.4) obtém-se para um semi-espaço qualquer:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0. \quad (1.6)$$

Esta é a equação fundamental do método da Eletorresistividade para uma subsuperfície de estrutura geológica qualquer e pode ser resolvida para estruturas bi e tridimensionais através de métodos numéricos fazendo uma discretização do modelo em malhas usando o método das diferenças finitas ou dos elementos finitos.

Para um condutor homogêneo, o  $\sigma$  é constante e diferente de 0. Sendo assim, obtemos a Equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0. \quad (1.7)$$

Para um eletrodo pontual de corrente no interior do espaço condutor, homogêneo e isotrópico, haverá influência da simetria esférica e o potencial assim dependerá da distância da fonte ao ponto de medição. Considerando isso, temos que o potencial medido obedece à seguinte equação:

$$V = \frac{I\rho}{4\pi r}. \quad (1.8)$$

No caso do eletrodo se situar na superfície do semi-espaço, e a condutividade acima deste semi-espaço for nula (terra-ar), a expressão do potencial elétrico é:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r}. \quad (1.9)$$

### 1.2.2 Técnicas

Num terreno homogêneo, a profundidade de penetração de corrente, aumenta com o aumento da separação dos eletrodos de corrente. Esta separação deve ser escolhida de modo que consigamos energizar o solo até a profundidade desejada e deve ser pelo menos igual à sua profundidade. Isso coloca limites práticos quanto à profundidade de investigação utilizando os métodos convencionais, devido à dificuldade em cobrir longas distâncias com os cabos e em gerar energia suficiente para tal necessidade. Deste modo, nos métodos utilizando os equipamentos normais as profundidades de penetração tem um limite de cerca de 1 km. No método da Eletorresistividade, duas técnicas são utilizadas para fazer o mapeamento da subsuperfície, a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Caminhamento Elétrico (Kearey, Brooks e Hill, 2009).

A Sondagem Elétrica Vertical - SEV tem seu principal uso no imageamento de camadas horizontais ou sub-horizontais. Seu funcionamento se baseia na expansão progressiva da distância entre os eletrodos ao redor de um ponto fixo central. Com essa metodologia, temos

que a cada medida, a corrente atingirá profundidades maiores de investigação e, por isso, é constantemente utilizado para determinação de espessuras de cobrecarga em levantamentos geotécnicos.

Na técnica do Caminhamento Elétrico, os eletrodos de corrente e de potencial são mantidos a um espaçamento constante e são movidos em conjunto, detectando, deste modo, variações laterais. É muito utilizada para localização de falhas e zonas de cisalhamento. Na geotecnia é usada para determinação da profundidade do embasamento e a presença de descontinuidades abruptas.

### 1.2.3 Arranjo de Eletrodos

Os eletrodos são comumente dispostos no terreno, sendo que dois geram uma circulação de corrente no meio e dois são utilizados para medir a diferença de potencial entre os pontos. O potencial medido no eletrodo M ( $V_M$ ) terá contribuições dos potenciais gerados pelos eletrodos A ( $V_A$ ) e B ( $V_B$ ), assim como ocorre no eletrodo N ( $V_N$ ). Podemos então calcular a diferença de potencial  $\Delta V = V_M - V_N$  como sendo:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right), \quad (1.10)$$

onde AM, AN, BM e BN são os afastamentos ou separação entre os eletrodos.

Isolando-se o parâmetro resistividade, obtém-se:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \left( \frac{2\pi}{\left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]} \right) = K \frac{\Delta V}{I}. \quad (1.11)$$

O parâmetro K é denominado fator geométrico do arranjo.

A expressão 1.11 é utilizada para calcular a resistividade elétrica em um semi-espaço homogêneo usando um arranjo genérico de quatro eletrodos. Nesse caso, o valor da resistividade será constante e não dependerá dos afastamentos ou separações entre os eletrodos. No caso de um semi-espaço heterogêneo, o valor obtido com o uso da equação 1.11 terá uma contribuição dos valores de todas as resistividades presentes em subsuperfície e é denominado de função resistividade aparente.

O conceito de resistividade aparente pode ser definido como a resistividade elétrica de um meio homogêneo equivalente que, substituindo o meio heterogêneo, provoca as mesmas reações elétricas observadas, nas mesmas condições geométricas dos eletrodos (Sato, 2002).

O arranjo Schlumberger possui quatro eletrodos alinhados, com  $a$  como o semi-afastamento entre os eletrodos de corrente, e  $b$  o afastamento entre os eletrodos de potencial (Fig 1.1).

O fator geométrico desse arranjo é dado por:

$$K = \pi \left( \frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right). \quad (1.12)$$

O arranjo dipolo-dipolo contém quatro eletrodos em linha, sendo que os dois primeiros são eletrodos de corrente espaçados de uma distância  $a$ , e os dois últimos são eletrodos de potencial, espaçados também de uma distância  $a$  (Fig 1.1). Entre os eletrodos de corrente e os eletrodos de potencial há um afastamento múltiplo de  $a$  ( $na$ ). O fator geométrico é:

$$K = \pi na(n+1)(n+2). \quad (1.13)$$

Para a realização deste trabalho foram utilizados os arranjos dipolo-dipolo e Schlumberger devido a ter obtido os melhores resultados no processo de modelagem.

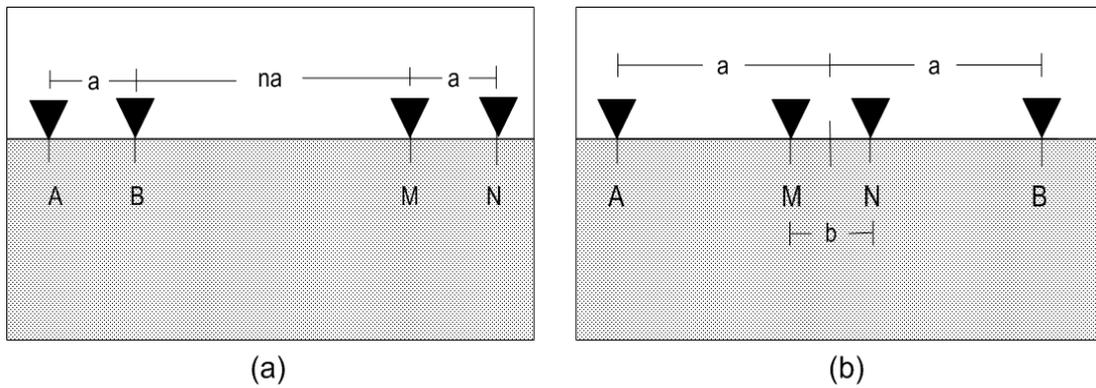


Figura 1.1: Arranjos dos tipos dipolo-dipolo(a) e Schlumberger(b).

Também foram feitas inversões geofísicas para cada um destes arranjos com o objetivo de obtermos uma imagem com melhor resolução, onde seja possível identificar melhor as estruturas.

## CAPÍTULO 2

# Modelagem e Inversão Geométrica Bidimensional

Neste capítulo será descrito como foram feitas as modelagens geométricas bidimensionais. Para este trabalho foram escolhidas três situações geológicas diferentes com base em problemas históricos que poderiam ter sido evitados se fossem feitos estudos geofísicos preventivos e algumas situações corriqueiramente estudadas na área da engenharia. Estes modelos escolhidos foram: determinação da localização e geometria de um corpo rochoso; uma região onde ocorre a presença de falhas em subsuperfície; uma região com metarenito cobrindo uma área cárstica com presença de cavernas subterrâneas equilibradas pela força da água do lençol freático. Serão descritos mais adiante os processos que levam ao surgimento das cavernas cársticas e o seu posterior desmoronamento, surgimento das falhas e de intrusões, bem como os problemas que cada um pode acarretar para a engenharia.

### 2.1 Blocos de Rocha ou Matacões

#### 2.1.1 Descrição Geológica

Matacões são definidos como sendo sedimentos com tamanho superior a 256mm. Esses matacões normalmente possuem propriedades físicas muito particulares. A sua elevada dureza o torna um grande problema para as empresas de engenharia, pois, devido à grande dificuldade em se perfurar essa rocha, torna-se impraticável a construção de fundações, andaimes subsolo em prédios, etc na região onde ficam localizados. Essas rochas também costumam apresentar uma elevada resistividade elétrica, o que pode torná-lo facilmente identificável por métodos geométricos. Assim sendo, a utilização de geofísica pode ser de grande utilidade para a identificação dessas estruturas que podem acabar gerando gastos muito maiores não previstos para as empresas de engenharia.



Figura 2.1: Exemplo de problema gerado pela presença de um matacão não-mapeado previamente utilizando geofísica. (Fonte: [www.altaresolucao.com.br](http://www.altaresolucao.com.br))

### 2.1.2 Modelo Geométrico e Elétrico

Para fazer a modelagem de um terreno com presença de matacões em subsuperfície foi utilizado um bloco de 100m de comprimento e 34m de profundidade. A matriz escolhida para o local foi o arenito e conta com a presença de 3 blocos de rocha na subsuperfície com diferentes tamanhos e formas para cada um deles, a fim de representar a grande variedade de configurações que um matacão pode se apresentar.

O arenito foi considerado como tendo uma resistividade de aproximadamente  $680\Omega.m$ , enquanto os matacões, materiais comumente mais resistivos, tiveram a resistividade adotada como  $2600\Omega.m$  (Castro et al., 2013)

## 2.2 Falhamentos e Estruturas de Deformação

### 2.2.1 Descrição Geológica

Falhas são estruturas rúpteis que ocorrem nas rochas da crosta terrestre, em geral de origem tectônica. Quase sempre são envolvidas por halos de estruturas subsidiárias, referidas como



Figura 2.2: Exemplo de problema gerado pela presença de uma falha não-mapeada previamente utilizando geofísica ocorrido em Salvador-Bahia. (Fonte: Informativo do Serviço Geológico do Brasil - CPRM - MME/SGM - Ano 4 - Nº 16 - Edição de junho de 2007)

zonas de danos da formação na falha. As possíveis origens para as estruturas de danos incluem: as flexões das camadas pela falha, os deslizamentos repetidos sobre superfícies internas da zona da falha, a amplificação das tensões nos terminais da falha e as deformações concentradas nas zonas de conexão de segmentos de falhas vizinhas (Cox e Scholz, 1978; Antonellini e Aydin, 1994; Vermilye e Scholz, 1998).

O desenvolvimento de falhas com dezenas a centenas de metros de rejeitos, cortando sequências sedimentares que incluem arenitos, siltitos e folhelhos, tem sido descrito por diferentes geólogos estruturalistas (Aydin e Johnson, 1988; Shipton e Cowie, 2003; Cowie e Scholz, 1992). Zonas de danos tem sido reportadas tanto em falhas normais, quanto em falhas reversas, assim como em falhas transcorrentes.

Em litologias arenosas porosas existem três elementos estruturais que podem ser observados em afloramentos de zonas de falhas que são: (i) bandas individuais de deformações de cisalhamento caracterizadas por intensa catáclase de grãos e redução de porosidade; (ii) zonas de densas concentrações de bandas de deformações (zonas de bandejamento que podem encaixar zonas de rocha sã); e (iii) superfícies de deslizamentos ou de fricção. As relações espaciais entre essas estruturas evidenciam um desenvolvimento sequencial (Figura 2.1).

O primeiro estágio no processo de falhamento de um arenito é o crescimento de uma ou de poucas bandas de deformação isoladas, através das quais ocorrem pequenos deslocamentos relativos paralelos à banda, de poucos milímetros a uns poucos centímetros de extensão. As deformações no interior de uma banda envolvem a reorganização de grãos por deslizamentos e a redução granulométrica por cataclase, que produzem uma acentuada redução na porosidade dos arenitos. Sua natureza e extensão depende da litologia, do mergulho da estrutura relativa à direção de deslizamento da falha e do sistema de tensões.

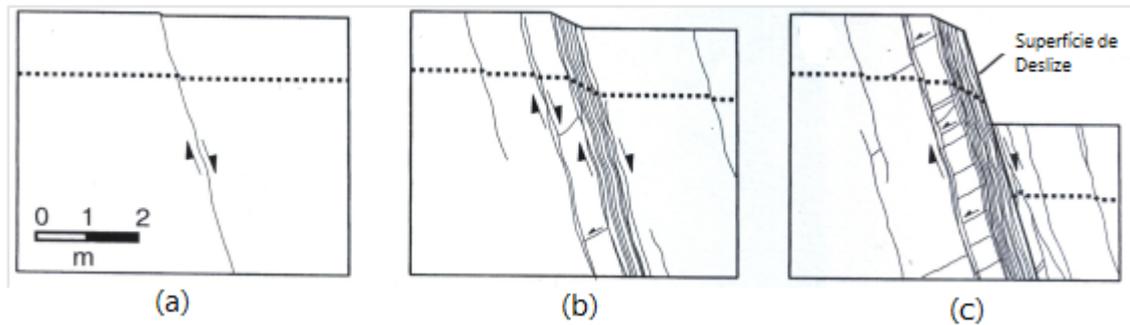


Figura 2.3: Desenvolvimento de uma zona de danos numa falha normal. (Fonte: Souza, 2013)

O segundo estágio no desenvolvimento de falhas em arenitos é a aglutinação de dois ou mais conjuntos de bandas de deformação, formando uma zona de bandamentos. Os mais proeminentes arranjos de bandas podem alcançar alguns metros de largura e conter de dezenas à centenas de bandas. A espessura de uma zona de bandamentos aumenta simplesmente pela adição de mais bandas de deformação. O deslocamento de cisalhamento relativo em uma zona de bandamentos é a soma dos deslocamentos individuais de seus membros e pode alcançar de 25 a 30cm em uma zona contendo cerca de 100 bandas (Aydin e Johnson, 1988; Johansen e Fossen, 2008). A densidade de deformação tende a atingir seu máximo na região do núcleo de falha e ao afastar-se deste, diminui exponencialmente.

O terceiro estágio no desenvolvimento de falhas em arenitos é a do surgimento de superfícies discretas de deslizamentos, contendo superfícies polidas e linhas de estrias, indicativas da orientação dos deslizamentos. Há indícios de que superfícies de deslizamentos se nucleiam como peças decamétricas que se interligam formando uma rede anastomosada bem densa.

Uma zona de danos, portanto, é constituída por arranjos densos de bandas de deformação e ocasionais superfícies de deslizamentos, juntamente com uma proporção da rocha hospedeira relativamente intacta entre elas.

### 2.2.2 Modelo Geométrico e Elétrico

Para modelagem desta deformação usaremos como base o modelo descrito por De Souza(2013) que constitui-se de um modelo geométrico-estrutural, que se constitui de um bloco de arenito de 200 metros de comprimento, com uma falha vertical com rejeito de 100 metros, localizada no centro do bloco. Na falha ocorrem bandas de deformação paralelas ao plano de falha com diferentes concentrações. A zona de danos tem uma extensão lateral de 50 metros e foi adotada uma distribuição simétrica de sete faixas de bandeamentos nessa zona de danos estruturais (Souza, 2013).

Para este trabalho foi utilizado um bloco de arenito com 100 metros de comprimento e uma falha inclinada com rejeito de 30 metros. As bandas de deformação possuem uma extensão lateral total de 10 metros e foi adotada uma distribuição simétrica de 4 faixas de bandeamentos nesta zona de danos estruturais.

A frequência de bandas de deformação no centro da zona de danos foi adotada como sendo 200 bandas por metro, cada banda tendo 2mm de espessura. Na tabela 2.1 é mostrado o decréscimo lateral da frequência de bandas à medida que se afasta do plano central da falha. Esses valores estão em conformidade com o que está presente na literatura (Shipton e Cowie, 2003; Johansen e Fossen, 2008; Kolyukhin e Fossen, 2010).

Foi adotada a porosidade da rocha sã como sendo 25%, e a porosidade da parte mais deformada como 5%, havendo assim uma redução de 80%.

Faixas Litológicas	Frequência de bandas de deformação (bandas por metro)	Espessura total das bandas de deformação
1	200	40cm
2	125	25cm
3	100	20cm
4	75	15cm

Tabela 2.1: Frequência de bandas de deformação versus espessura total das bandas de deformação na zona de falha. (Fonte: Souza, 2013)

Para calcular as resistividades em cada zona de bandeamento foi utilizada a lei de Archie (Eq. 1.1). Considerando os parâmetros para esta equação como sendo:  $\rho_w=50\Omega.m$  e  $m=1,8$ , foram obtidos resultados para a resistividade da rocha sã, com 25% de porosidade, de aproximadamente  $606\Omega.m$  e para uma banda de deformação, com 5% de porosidade, de aproximadamente  $10985\Omega.m$ . Assim sendo, a resistividade para esta zona de danos foi calculada levando-se em conta que esta região fosse formada por uma zona de rocha sã e uma zona de bandas conectadas como se fosse um meio binário. Isto está explicitado na Figura 2.4.



Figura 2.4: Representação da zona central com 200 bandas de deformação por metro, sendo que cada banda possui 2 mm de largura, totalizando em 0,4 m de rocha deformada com 5% de porosidade. (Fonte: Souza, 2013)

Desse modo, podemos considerar que os dois componentes estão combinados em série e que a resistividade do meio composto equivalente pode ser calculada como:

$$\rho_{eq} = (x)\rho_1 + (1 - x)\rho_2, \quad (2.1)$$

sendo  $x$  a largura da zona de bandas. Dessa forma foi construída a tabela 2.2 relacionando o número de bandas de deformação e a resistividade média das diferentes faixas de zonas de bandejamento.

Frequência de bandas de deformação (bandas por metro)	Resistividade da Rocha $\Omega.m$
200	4758
125	3201
100	2682
75	2163

Tabela 2.2: Densidade de bandas de deformação versus resistividade da rocha. (Fonte: Souza, 2013)

## 2.3 Cavernas Cársticas Subterrâneas

### 2.3.1 Descrição Geológica

Os relevos cársticos são encontrados em locais onde há forte presença de rochas calcárias, ou ainda vários outros tipos de rochas carbonáticas. Esses relevos podem ser divididos em exocarstes (dolinas, paredões) e endocarstes (cavernas). Os carstes possuem como uma das principais características a absorção de água, que ocorre de forma muito rápida do solo para a rocha. Quando a água entra em contato com o carbono presente nessas rochas, ocorre o fenômeno do intemperismo químico, levando à dissolução de parte destas, devido à acidez adquirida no processo. É quando ocorre essa dissolução que as cavernas subterrâneas são formadas.

As cavernas subterrâneas podem estar localizadas a dezenas de metros de profundidade e possuem muitos metros de extensão. A presença de lençóis freáticos na área ajuda a manter o equilíbrio entre a superfície e as cavernas. A variação do nível piezométrico pode acabar propiciando a migração dos solos circundantes para o interior dessas cavernas, acarretando assim em deslizamentos e afundamentos de terra na superfície.

### 2.3.2 Buraco de Cajamar

Em 1986 ocorreu um dos maiores casos de afundamento de terra do Brasil. Este afundamento ocorreu na cidade de Cajamar, região metropolitana de São Paulo. Um buraco com dimensões de 32m de comprimento e 13m de profundidade levou consigo 3 moradias e deixou problemas na estrutura de imóveis localizados a alguns quilômetros de distância do local do acidente. Existia nessa região um solo muito poroso com presença de muitas cavernas cársticas em subsuperfície que eram equilibradas pela água do lençol freático. A instalação de uma fábrica de bebidas na região acarretou na diminuição do nível piezométrico, devido à utilização da água deste lençol pela fábrica.



Figura 2.5: Exemplo de problema gerado pelo não-mapeamento correto de uma caverna cárstica ocorrido em Cajamar-São Paulo. (Fonte: [www.ebanataw.com.br/roberto/pericias/CasoCajamar.html](http://www.ebanataw.com.br/roberto/pericias/CasoCajamar.html))

Estudos posteriores mostraram que o acidente conhecido como Buraco de Cajamar ocorreu devido à diminuição do nível do lençol na área, causado pela instalação de poços freáticos nas dependências da fábrica de bebidas aliada à explosões ocorridas numa pedreira próxima, o que serviu como catalizador da situação. Foi com base neste acidente que foi escolhido o modelo Cavernas Cársticas a ser estudado posteriormente, acidente este que poderia ter sido evitado mediante um levantamento geofísico na área.

### 2.3.3 Modelo Geométrico

Para a construção do modelo que se aproximasse do visto na região do Buraco de Cajamar, foi desenvolvido um bloco com 100 metros de comprimento constituído de uma cobertura metarenítica de espessura 5m, rochas carbonáticas que atingem até 100 metros de profundidade e com a presença de cavernas subterrâneas com diâmetro de 30 metros de comprimento.

Foram desenvolvidos dois modelos diferentes para verificar como a geofísica poderia ser aplicada nessa situação: a primeira como sendo a condição inicial da subsuperfície, com as cavernas preenchidas com a água que dava equilíbrio a terra acima da caverna e a situação em que parte da água já foi drenada pela fábrica de bebidas, na qual foi adotada uma proporção de 3/8 para a quantidade de água restante na caverna.

As resistividades adotadas foram de  $50\Omega.m$  para a água,  $600\Omega.m$  para a cobertura arenítica,  $1700\Omega.m$  para o calcáreo e, como o ar tem uma resistividade infinitamente grande, foi adotado

o valor de  $5000\Omega.m$ , um valor relativamente grande considerando os outros parâmetros, para fins de facilitar a modelagem.

## 2.4 RES2DMOD

O RES2DMOD é um programa de modelagem elétrica 2D que calcula as pseudoseções de resistividade aparente para um modelo geológico em subsuperfície definido pelo usuário. É um programa que tem grande utilidade na escolha da melhor configuração (arranjo e separações) para o modelo geológico pretendido.

O modelo utilizado pelo método das diferenças finitas ou dos elementos finitos divide a subsuperfície em uma certa quantidade de blocos usando uma malha retangular com o eixo X paralelo a linha da interface terra-ar e o eixo Z orientado para baixo. A fim de obter resultados com uma acurácia maior, Loke(1994) introduziu algumas mudanças no modelo de Dey e Morrison(1979). O que o método das diferenças finitas basicamente faz é calcular o potencial em vários nós da malha retangular. Estes nós podem ser indexados por  $i=1, 2, \dots, m$  ao longo do eixo X e por  $j=1, 2, \dots, n$  ao longo eixo Z, sendo que os limites  $i=m$  e  $j=n$  representam pontos localizados a uma distância infinita do centro da região.

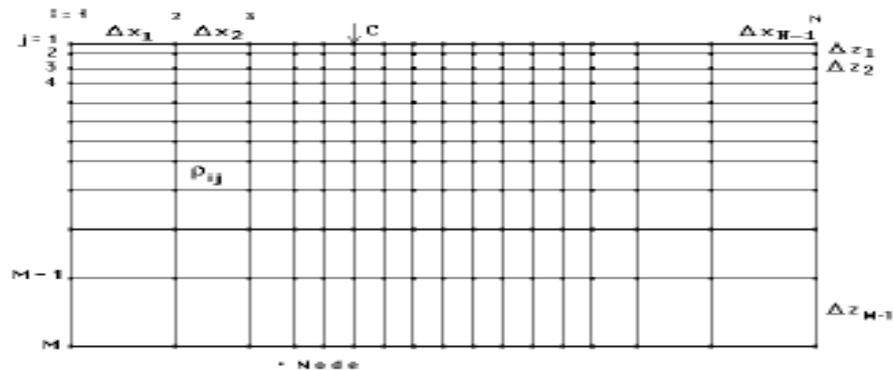


Figura 2.6: Malha de blocos retangulares utilizada no programa RES2DMOD.

Para gerar o modelo é necessário que sejam informadas os valores das resistividades de cada bloco da malha retangular através de um arquivo de entrada. É possível também definirmos as profundidades para cada linha da malha. Com essas informações, torna-se possível modelar qualquer modelo geológico complexo que seja requerido.

## 2.5 RES2DINV

O RES2DINV é um programa de inversão geofísica 2D que utiliza um modelo no qual a subsuperfície é dividida em blocos retangulares. O objetivo do programa é determinar as

resistividades para cada um desses blocos e produzir uma pseudo-seção de resistividades aparentes que esteja em concordância com as medidas reais.

Para fazer a inversão é utilizado o método dos mínimos quadrados com restrição de suavidade (smoothness-constrained least-square method)(deGroot-Hedlin and Constable,1990; Sasaki,1992), o qual é baseado na equação:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + u\mathbf{F})\mathbf{d} = \mathbf{J}^T \mathbf{g}, \quad (2.2)$$

onde:

- $\mathbf{F} = \mathbf{f}_x \mathbf{f}_x^T + \mathbf{f}_z \mathbf{f}_z^T$
- $\mathbf{f}_x$  é o filtro de nivelamento horizontal;
- $\mathbf{f}_z$  é o filtro de nivelamento vertical;
- $\mathbf{J}$  é a matriz de derivadas parciais;
- $u$  é o fator de amortecimento;
- $\mathbf{d}$  é o vetor de perturbação do modelo;
- $\mathbf{g}$  é o vetor discrepância.

Uma vantagem deste método é que o fator de amortecimento e os filtros de nivelamento podem ser modificados para se ajustarem melhor a cada tipo de dado.

## CAPÍTULO 3

### Resultados

#### 3.1 Blocos de Rocha ou Matacões

Foi feita a modelagem de um bloco de rocha em subsuperfície constituído predominantemente por arenito limpo, medindo 100 metros de comprimento e 40 metros de profundidade. Os blocos de rocha foram centrados em  $x_1=30\text{m}$ ,  $z_1=10\text{m}$ ;  $x_2=25\text{m}$ ,  $z_2=15\text{m}$ ;  $x_3=55\text{m}$ ,  $z_3=15\text{m}$ .

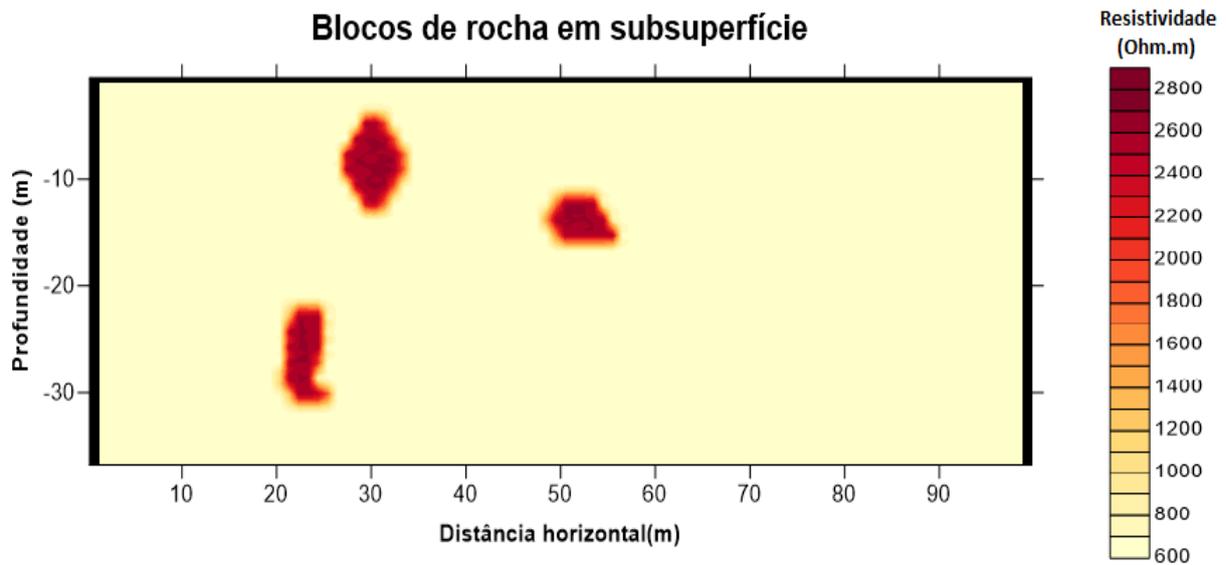


Figura 3.1: Modelo Geológico de uma região com presença de matacões em subsuperfície.

Foram feitas as modelagens utilizando os arranjos dipolo-dipolo e Schlumberger com uma malha onde o bloco inicial possuía 1 metro e os blocos subsequentes estavam afastados com uma distância de 1,5m entre eles. As pseudo-seções construídas para a resistividade aparente estão mostradas nas figuras 3.2 e 3.3.

É possível verificar na modelagem com o arranjo dipolo-dipolo que há uma anomalia de alta resistividade no ponto próximo ao local onde está localizado o bloco de rocha na porção esquerda superior. Como que uma mancha saindo desta anomalia, é possível verificar uma segunda anomalia, de menor intensidade, na posição onde está localizado o segundo bloco

de rocha posicionado mais ao centro do bloco. Mais afastado dos blocos de rocha o modelo nos fornece valores de resistividade próximos ao do arenito de fato.

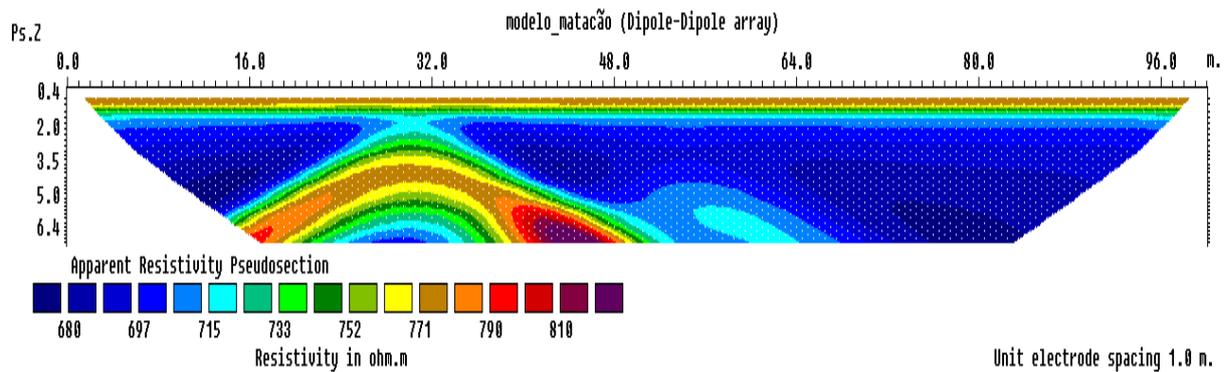


Figura 3.2: Pseudo-seção de resistividade aparente de blocos de rocha em subsuperfície usando o arranjo dipolo-dipolo.

O modelo gerado utilizando o arranjo Schlumberger mostra melhor a localização dos blocos de rocha posicionados lateralmente. Apresenta uma grande anomalia de alta resistividade na porção a esquerda do modelo com uma anomalia mais a direita de menor intensidade. Os blocos posicionados um sobre o outro não puderam ser diferenciados devido a limitações do método, que tem mais dificuldade em diferenciar esses blocos de mesma intensidade e relativamente muito próximos.

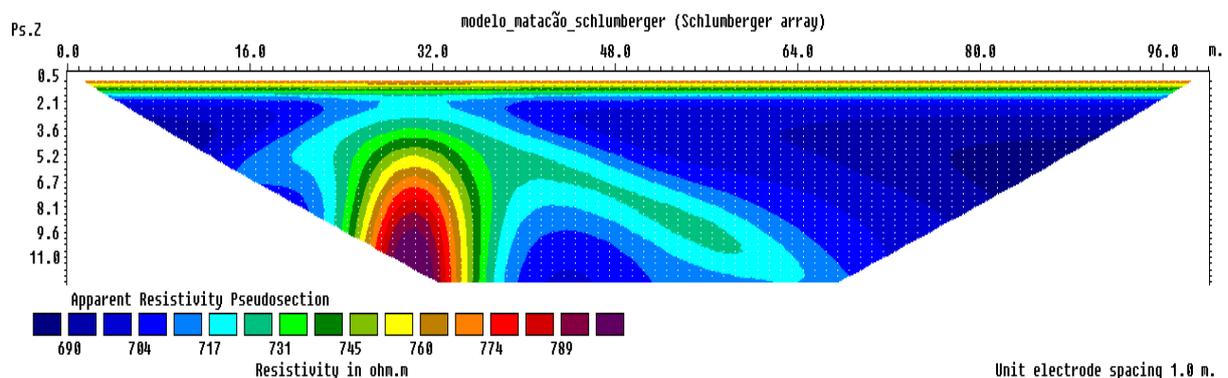


Figura 3.3: Pseudo-seção de resistividade aparente de blocos de rocha em subsuperfície usando o arranjo Schlumberger.

Após feita a inversão, foi possível verificar as anomalias detectadas na modelagem, mas muito mais concentrado, de modo que é possível identificar claramente as posições dos dois blocos superiores posicionados lateralmente. Na posição onde estaria situado o bloco mais inferior, a anomalia de resistividade se mostra com uma intensidade maior do que onde só tem um bloco. Devido a limitações do arranjo, a profundidade atingida não é a ideal para a prospecção, mas, mesmo assim, fornece bons dados a serem examinados.

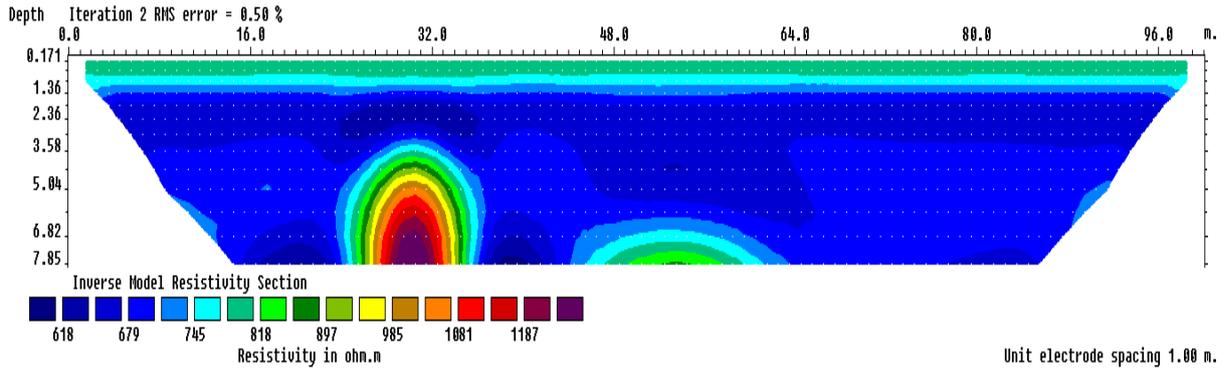


Figura 3.4: Inversão do modelo de blocos de rocha em subsuperfície utilizando arranjo dipolo-dipolo.

A inversão do dado gerado usando o arranjo Schlumberger nos fornece dados com melhores profundidades, mas ainda não é possível localizar com precisão o posicionado na porção mais inferior. Os blocos superiores apresentam a mesma configuração do dipolo-dipolo, com uma intensidade maior no bloco à esquerda do que no da direita e uma pequena deformação à direita da anomalia de menor intensidade.

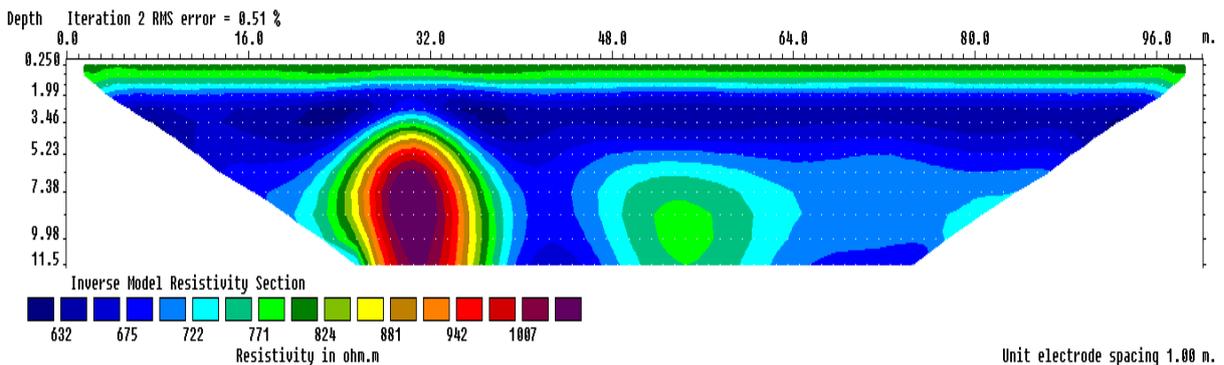


Figura 3.5: Inversão do modelo de blocos de rocha em subsuperfície utilizando arranjo Schlumberger.

## 3.2 Falha Inclinada com Zonas de Bandeamento

### 3.2.1 Falha Inclinada Aflorante com Zonas de Bandeamento

Foi feita a modelagem para uma falha inclinada aflorante com zona de deformação utilizando um bloco de arenito limpo com dimensões de 100 metros de comprimento e 70m de profundidade. A falha inclinada esteve centrada  $x=25m$  e percorria toda a extensão vertical do bloco.

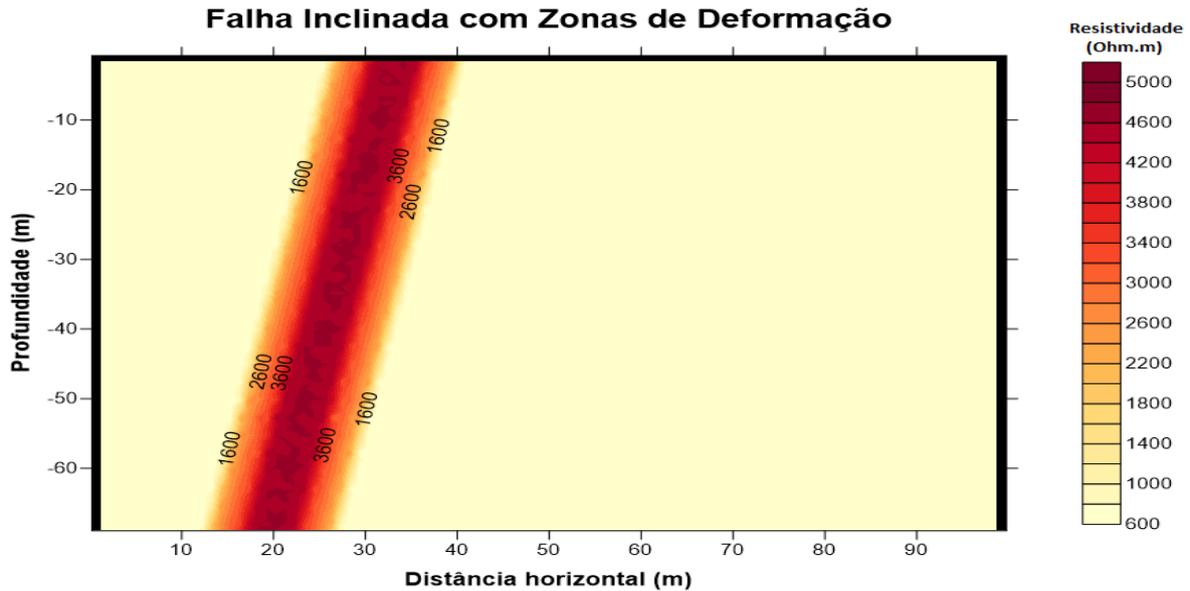


Figura 3.6: Modelo geológico de uma falha inclinada aflorante.

Para gerar os modelos usando o RES2DMOD da Geotomo Software foi utilizada uma malha com blocos com comprimento de 0,5m e 2,5m de profundidade, exceto pelo primeiro bloco que possuía 1,5m de profundidade. Novamente foram utilizados os arranjos dipolo-dipolo e Schlumberger. As figuras 3.7 e 3.8 mostram as pseudo-seções de resistividades aparentes geradas pelo programa.

O modelo utilizando arranjo dipolo-dipolo gerou uma pseudo-seção de resistividades aparentes onde na posição da falha é possível verificar uma anomalia de alta resistividade "bifurcada", com um lado da anomalia paralela ao ângulo de mergulho da falha e outra aproximadamente perpendicular. Paralelo ao plano de falha foi possível verificar que a resistividade se mostra maior do que perpendicularmente. Distorções abaixo do plano de falha são características do arranjo dipolo-dipolo.

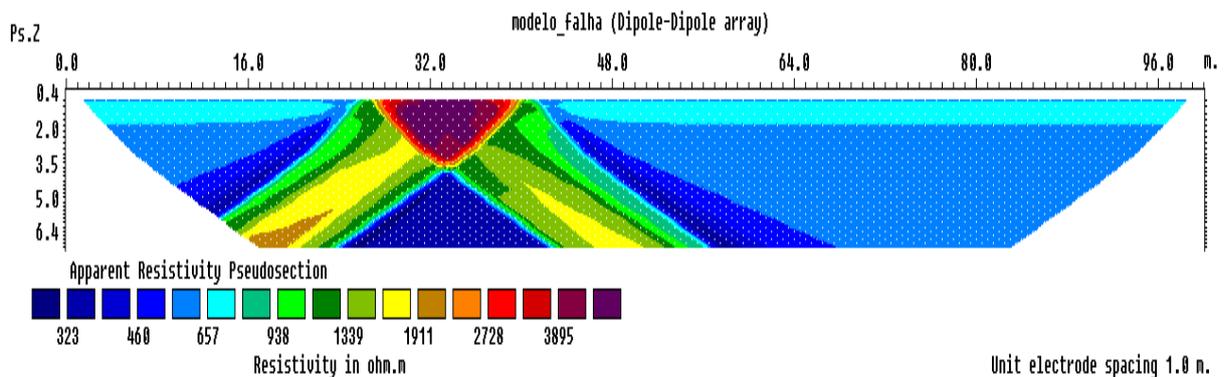


Figura 3.7: Pseudo-seção de resistividade aparente de uma falha inclinada aflorante utilizando o arranjo dipolo-dipolo.

Na pseudo-seção de resistividades aparentes gerada para o arranjo Schlumberger foi identificada uma anomalia de alta resistividade sub-vertical na posição referente à localização da falha. Junto a esta anomalia aparecem duas "asas" com resistividades menores que a da anomalia central, mas maiores do que a do arenito.

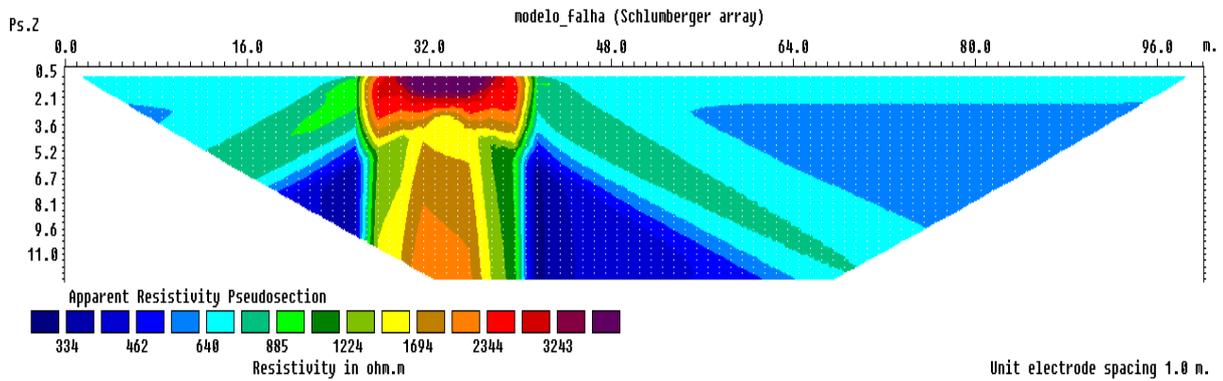


Figura 3.8: Pseudo-seção de resistividade aparente de uma falha inclinada aflorante utilizando o arranjo Schlumberger.

Após feita a inversão foi possível notar a presença de uma grande anomalia levemente inclinada na posição onde estaria a falha. Esta anomalia apresentou uma altíssima resistividade no seu centro e que diminuía gradativamente até chegar ao arenito. As resistividades do arenito apresentaram uma certa variação, mas muito pequenas em relação a variação arenito-falha.

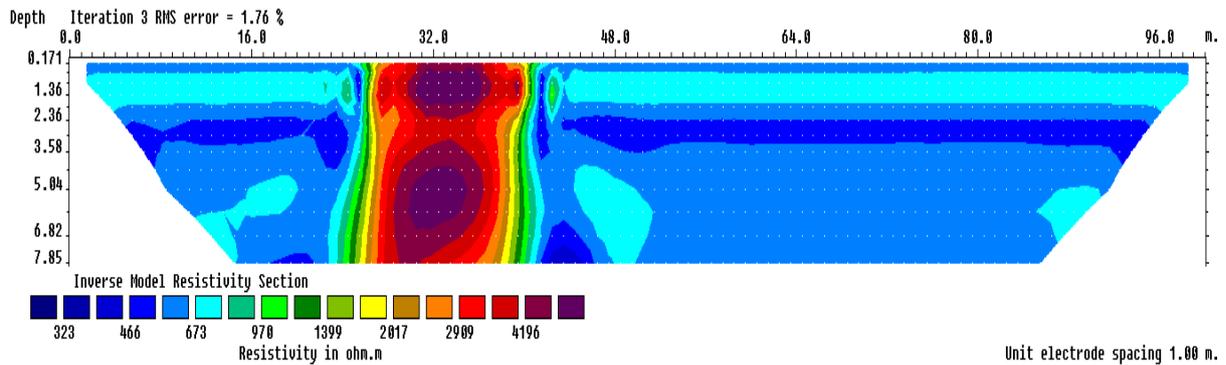


Figura 3.9: Inversão do modelo de uma falha inclinada aflorante utilizando arranjo dipolo-dipolo.

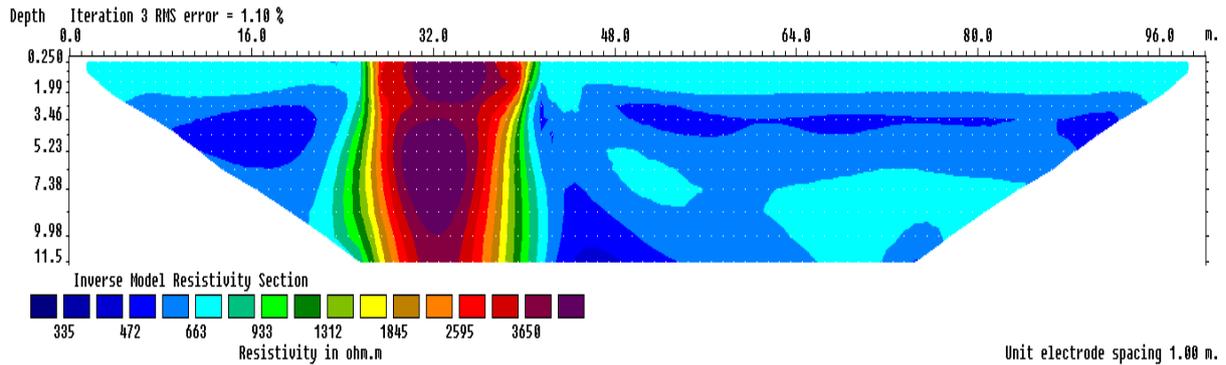


Figura 3.10: Inversão do modelo de uma falha inclinada aflorante utilizando arranjo Schlumberger.

### 3.2.2 Falha Inclinada com Zonas de Bandeamento e cobertura mais resistiva

Para esta modelagem foi utilizada a mesma configuração do bloco de arenito para a falha aflorante. A cobertura teve como resistividade  $5500.0\Omega.m$  e profundidade chegando a 4 metros.

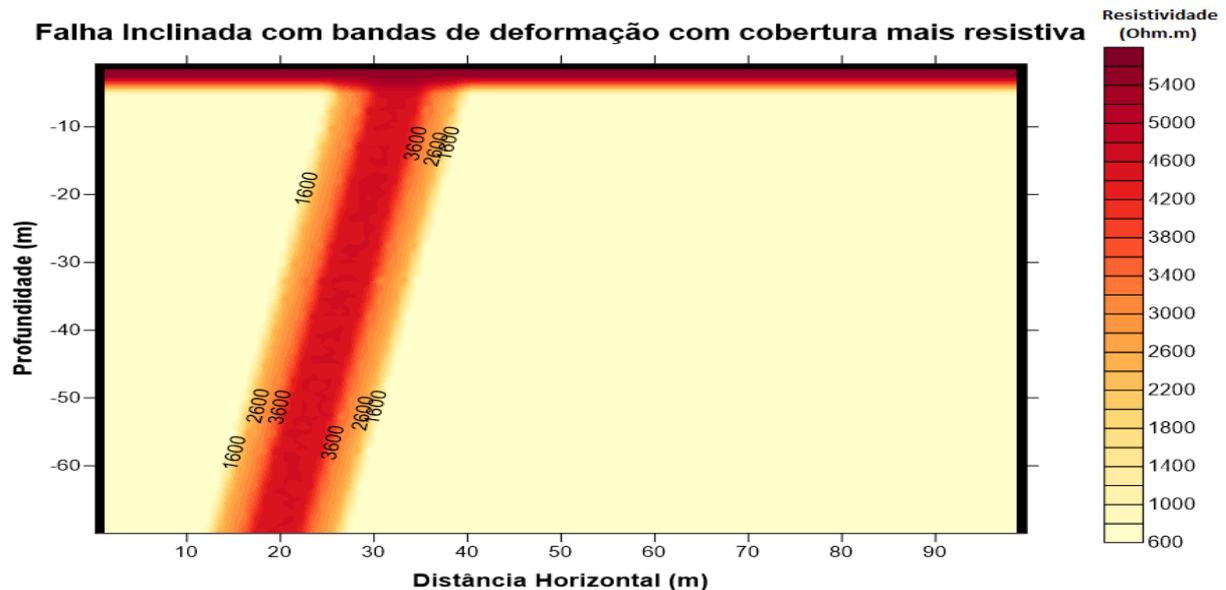


Figura 3.11: Modelo geológico de uma falha inclinada com cobertura mais resistiva.

A pseudo-seção de resistividade aparente utilizando o arranjo dipolo-dipolo para uma falha com cobertura mais resistiva apresentou uma anomalia bifurcada de baixa resistividade em relação a superfície na posição onde estaria localizada a falha. A pseudo-seção gerada utilizando o arranjo Schlumberger apresentou um resultado satisfatório para a forma e localização da anomalia, se mostrando um bom indicativo da presença da falha na região.

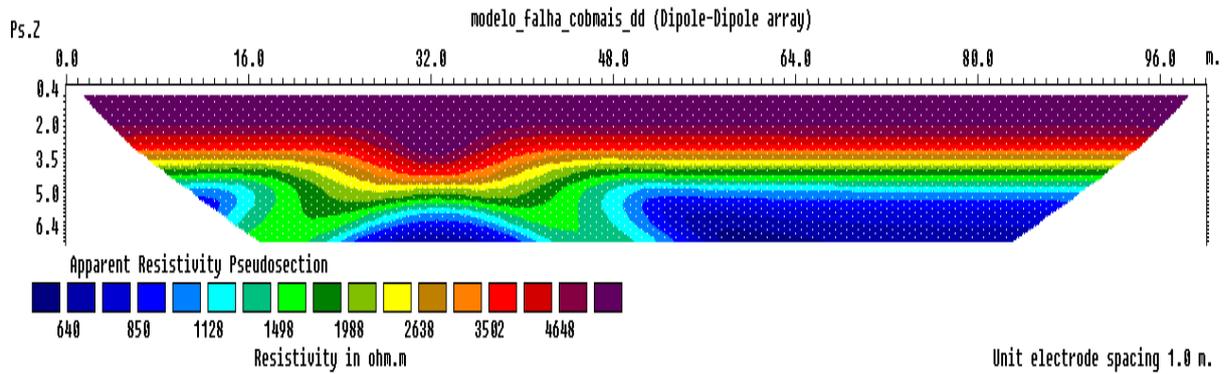


Figura 3.12: Pseudo-seção de resistividade aparente de uma falha inclinada com cobertura mais resistiva usando o arranjo dipolo-dipolo.

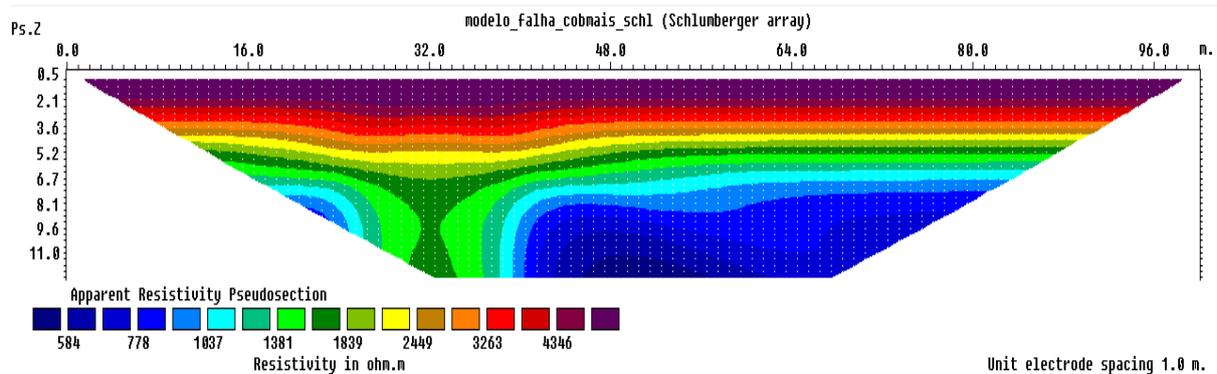


Figura 3.13: Pseudo-seção de resistividade aparente de uma falha inclinada com cobertura mais resistiva usando o arranjo Schlumberger.

Ao ser feita a inversão, ambos os resultados se mostraram satisfatórios, com um bom mapeamento da falha, sendo que o arranjo dipolo-dipolo ainda apresentou algumas distorções, apesar de a falha poder ser identificada com facilidade no perfil.

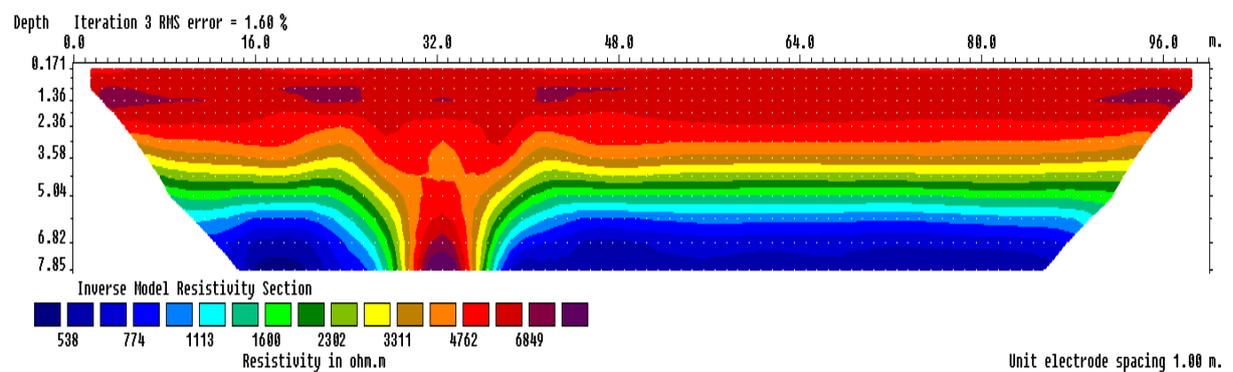


Figura 3.14: Inversão do modelo de uma falha inclinada com cobertura mais resistiva utilizando arranjo dipolo-dipolo.

O modelo utilizando o arranjo Schlumberger apresentou melhores resultados, com poucas

distorções, sendo possível identificar o centro da zona de falhada, a profundidade do topo da falha e a sua largura. O único parâmetro com dificuldade para determinar foi o ângulo de mergulho.

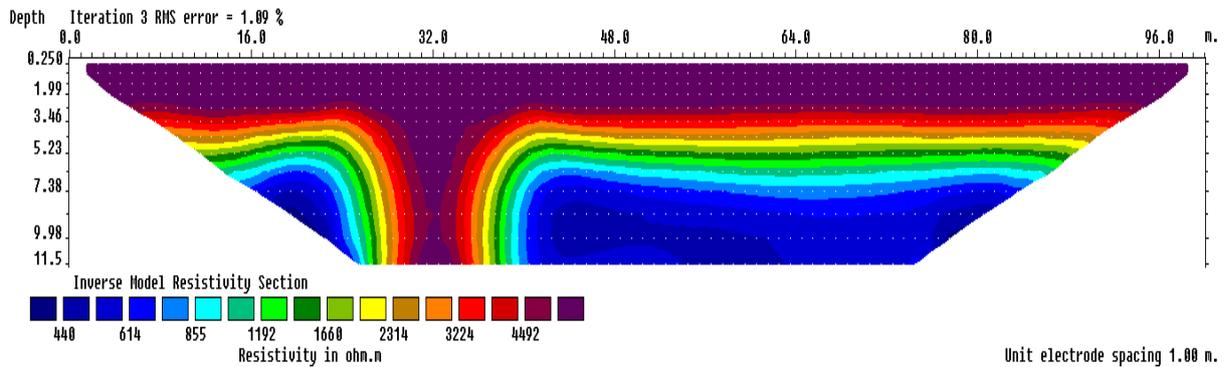


Figura 3.15: Inversão do modelo de uma falha inclinada aflorante com cobertura mais resistiva arranjo Schlumberger.

### 3.2.3 Falha Inclinada com Zonas de Bandeamento e cobertura menos resistiva

Mais uma vez o bloco utilizado teve as mesmas dimensões, bem como a malha do RES2DMOD da Geotomo Software. A cobertura utilizada teve como resistividade  $1300.0\Omega.m$  e profundidade de 4 metros.

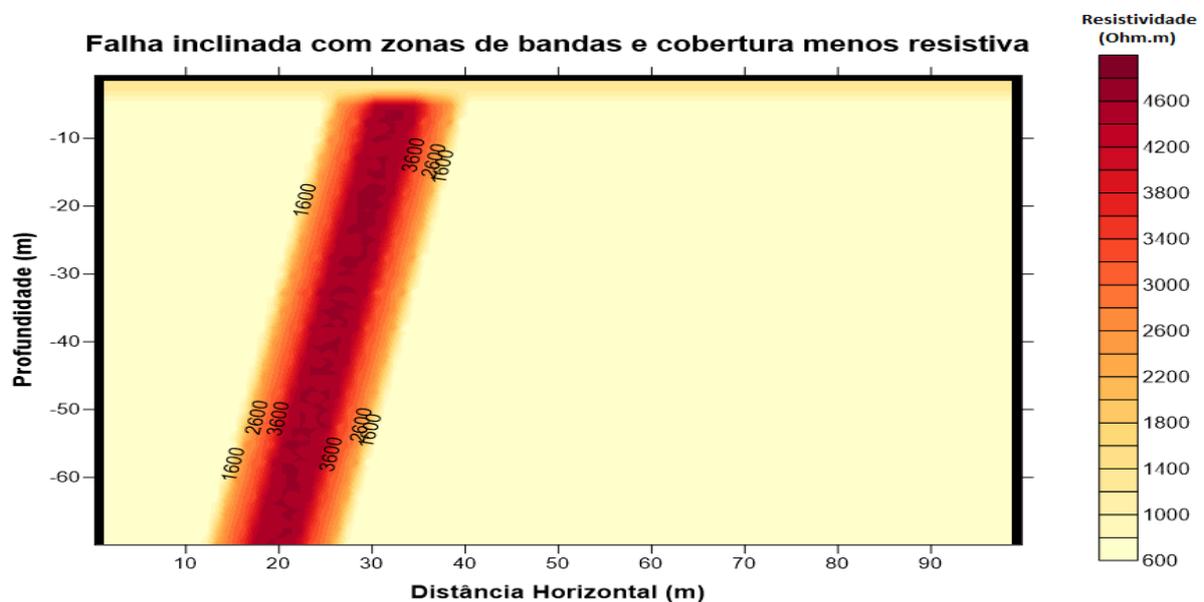


Figura 3.16: Modelo geológico de uma falha inclinada com cobertura menos resistiva.

Nas pseudo-seções de resistividades aparentes geradas para o modelo de uma falha inclinada com zonas de bandeamento com uma cobertura menos resistiva, é possível verificar a presença

de uma anomalia na região da falha, mas, pelo fato da anomalia possuir uma resistividade intermediária em relação às camadas inferiores, não é possível determinar com qualidade o valor da resistividade na região.

Na pseudo-seção gerada utilizando o arranjo dipolo-dipolo apresentou uma anomalia de alta resistividade com formato aproximadamente arredondado com um decaimento radial gradativo na posição onde está localizada a falha.

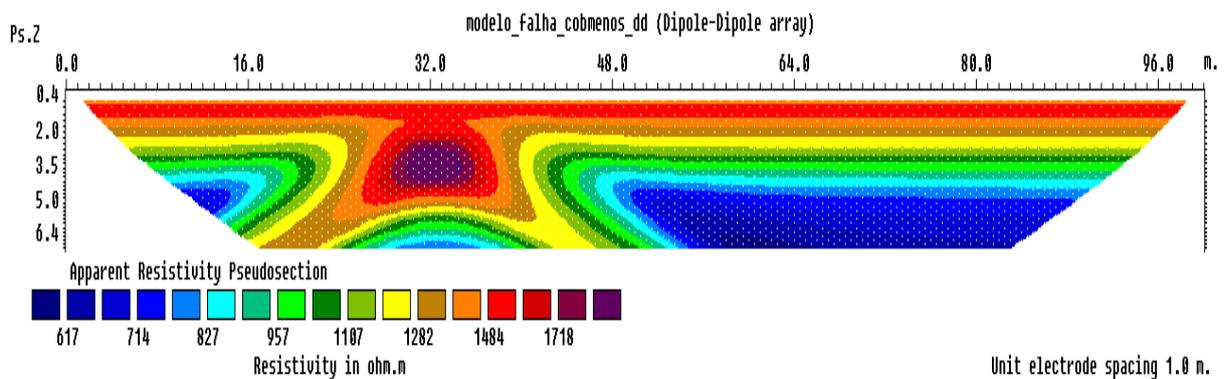


Figura 3.17: Pseudo-seção de resistividade aparente de uma falha inclinada com cobertura menos resistitiva usando o arranjo dipolo-dipolo.

Na pseudo-seção utilizando o arranjo Schlumberger foi possível notar uma anomalia com formato aproximado ao de uma falha, mais alongado. Essa anomalia apresentou uma resistividade maior do que a do arenito adjacente.

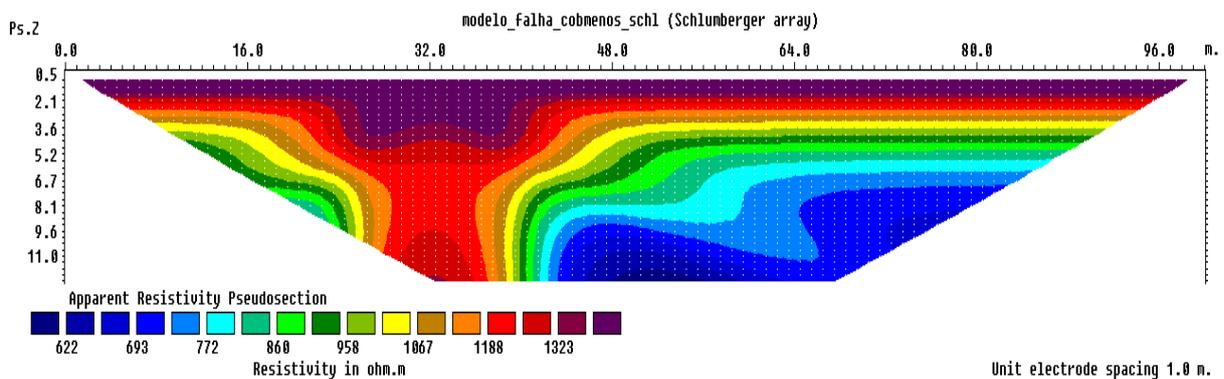


Figura 3.18: Pseudo-seção de resistividade aparente de uma falha inclinada com cobertura menos resistitiva usando o arranjo Schlumberger.

Após ser feita a inversão, os modelos para os dois arranjos apresentaram muito parecidos e muito próximos ao real. A inversão conseguiu corrigir o problema com a resistividade que apareceu na modelagem, sendo possível diferenciar com clareza a relação entre as resistividades do arenito, da falha e da cobertura. Foi possível determinar também a largura, profundidade do topo da falha e posição lateral, mas, mais uma vez, o mergulho não foi possível de ser determinado.

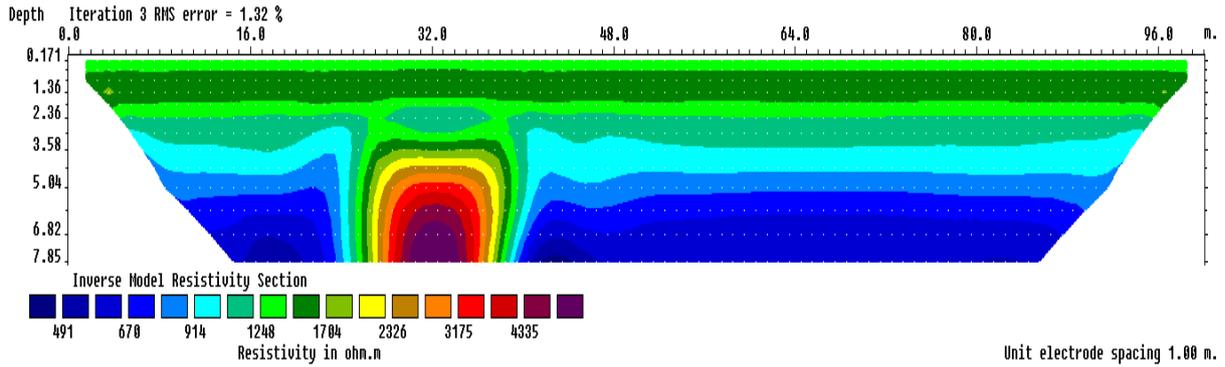


Figura 3.19: Inversão do modelo de uma falha inclinada com cobertura menos resistitiva utilizando arranjo dipolo-dipolo.

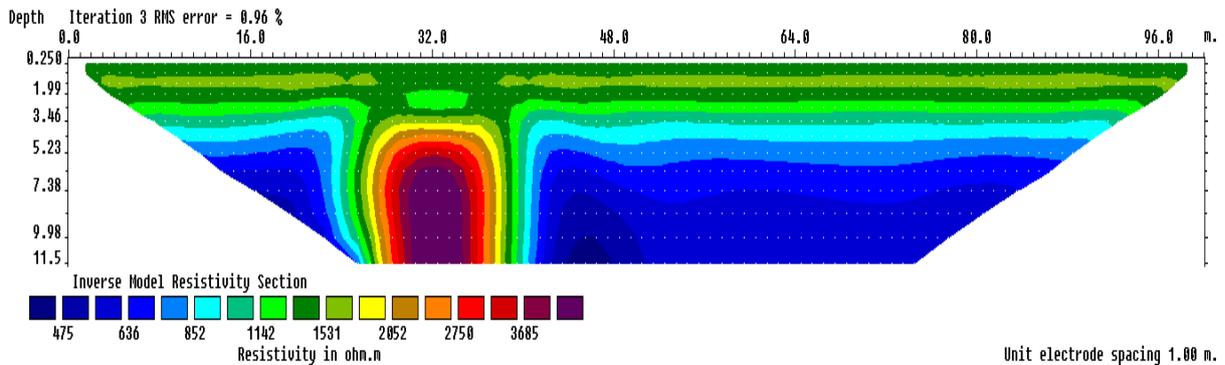


Figura 3.20: Inversão do modelo de uma falha inclinada com cobertura menos resistitiva utilizando arranjo Schlumberger.

### 3.3 Cavernas Cársticas

Para a construção deste modelo foi utilizado um bloco de calcário com dimensões de 200 metros de comprimento e 40m de profundidade. A caverna esteve centrada  $x=40m$  e  $z=10m$ .

Para melhor compreensão do trabalho, foram feitos dois diferentes modelos, um contendo uma caverna preenchida com água (condição inicial) e outra contendo uma caverna preenchida com água e ar (condição problemática). Os dois modelos são mostrados nas figuras 3.21 e 3.22.

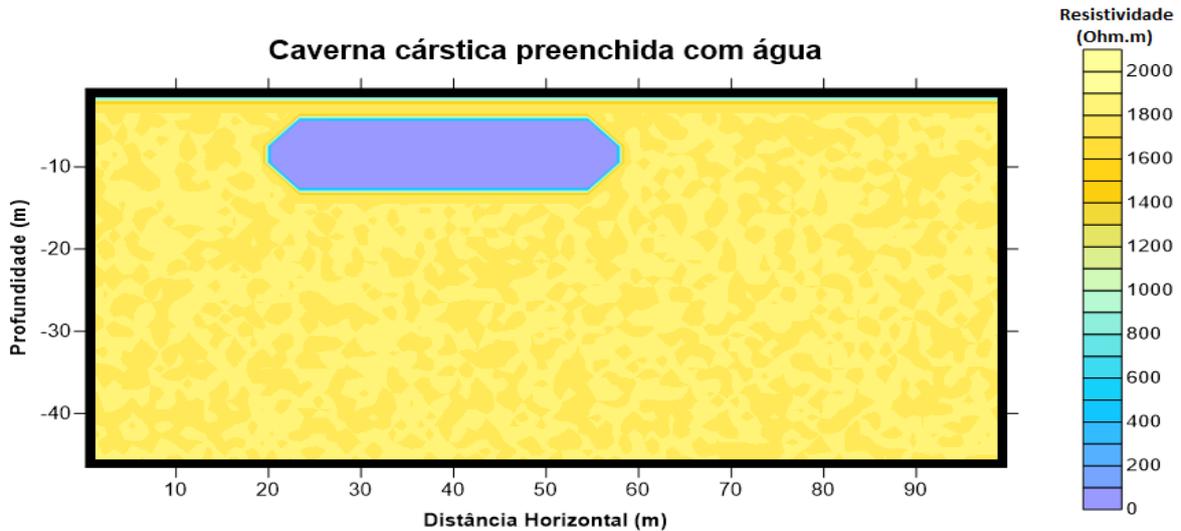


Figura 3.21: Modelo geológico de uma caverna cárstica preenchida com água sub-superfície.

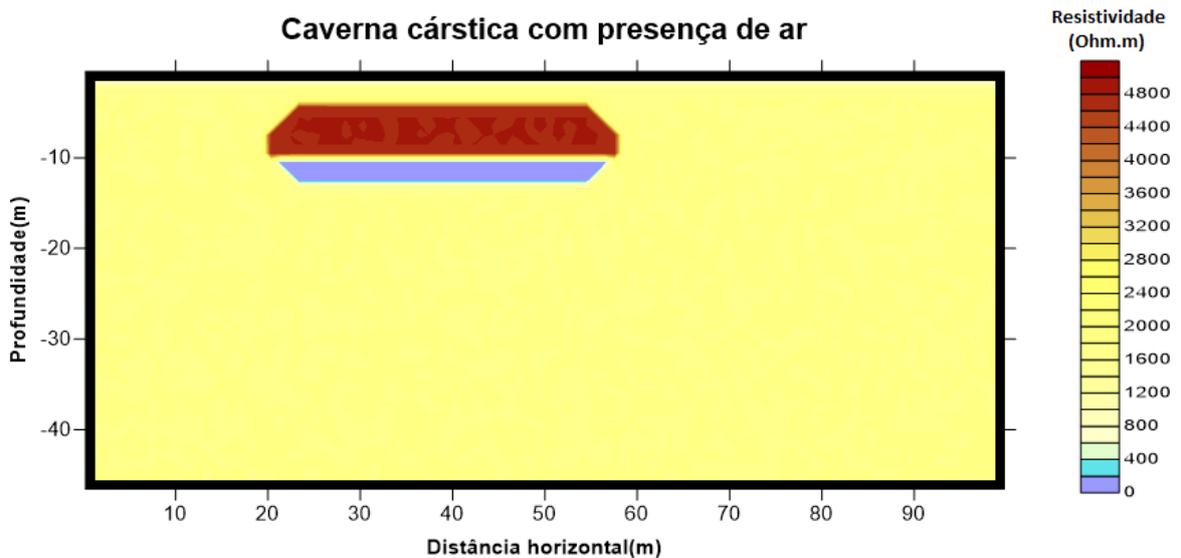


Figura 3.22: Modelo geológico de uma caverna cárstica preenchida com água e ar em subsuperfície.

Para construção destes modelos no programa de modelagem foi utilizada uma malha com blocos com dimensões de comprimento e profundidade iguais a 1 metro.

Na pseudo-seção de resistividades aparentes gerada para o modelo de uma caverna cárstica preenchida com água utilizando o arranjo dipolo-dipolo é possível perceber uma anomalia de baixa resistividade na forma de um anticlinal, na região onde está localizada a caverna. Nas regiões em volta desta anomalia foi verificada presença de altos valores de resistividade aparente.

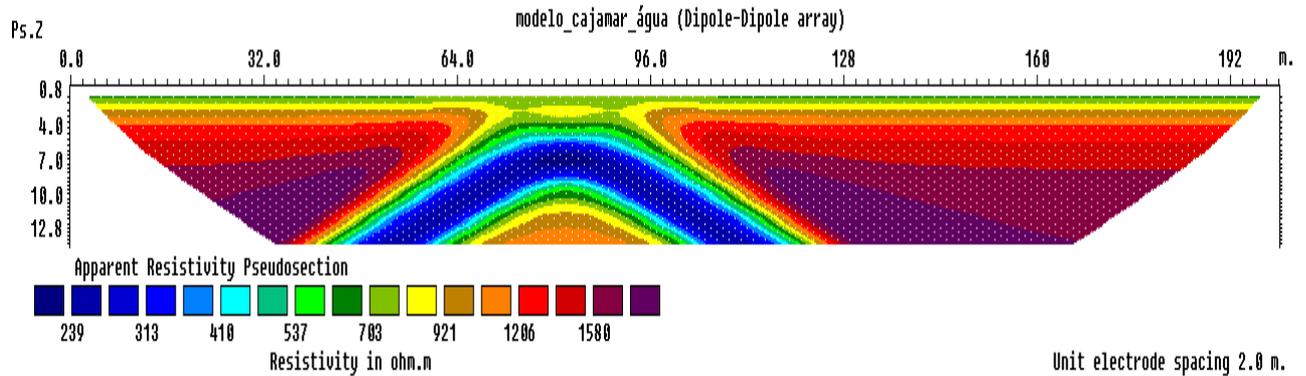


Figura 3.23: Pseudo-seção de resistividade aparente de uma região que contém uma caverna cárstica preenchida com água em subsuperfície usando o arranjo dipolo-dipolo.

Na pseudo-seção de resistividades aparentes gerada para o modelo de uma caverna cárstica preenchida com água utilizando o arranjo Schlumberger foi possível perceber a existência de uma anomalia de baixa resistividade, com uma forma alongada que se estende até o fim da pseudo-seção na posição, onde está localizada a caverna.

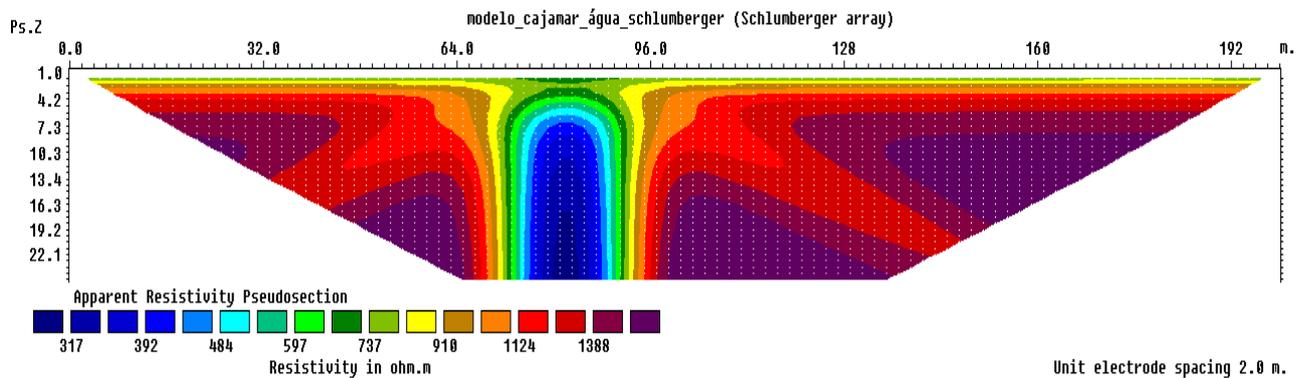


Figura 3.24: Pseudo-seção de resistividade aparente de uma região que contém uma caverna cárstica preenchida com água em subsuperfície usando o arranjo Schlumberger.

Na pseudo-seção gerada para o modelo de uma caverna cárstica preenchida 3/8 por água utilizando o arranjo dipolo-dipolo foi possível perceber uma anomalia circular com uma altíssima resistividade central e com diminuição gradativa radial.

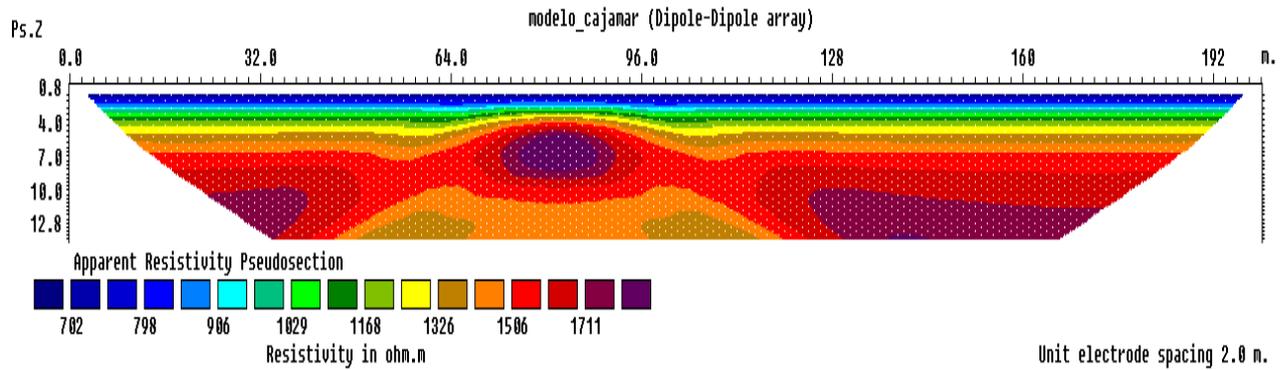


Figura 3.25: Pseudo-seção de resistividade aparente de uma região que contém uma caverna cárstica preenchida com água e ar em subsuperfície usando o arranjo dipolo-dipolo.

Utilizando o arranjo Schlumberger verificou-se baixas resistividades nas regiões mais próximas a superfície e uma altíssima resistividade nas camadas inferiores com uma anomalia de baixa resistividade no centro destas camadas com formato aproximadamente arredondado.

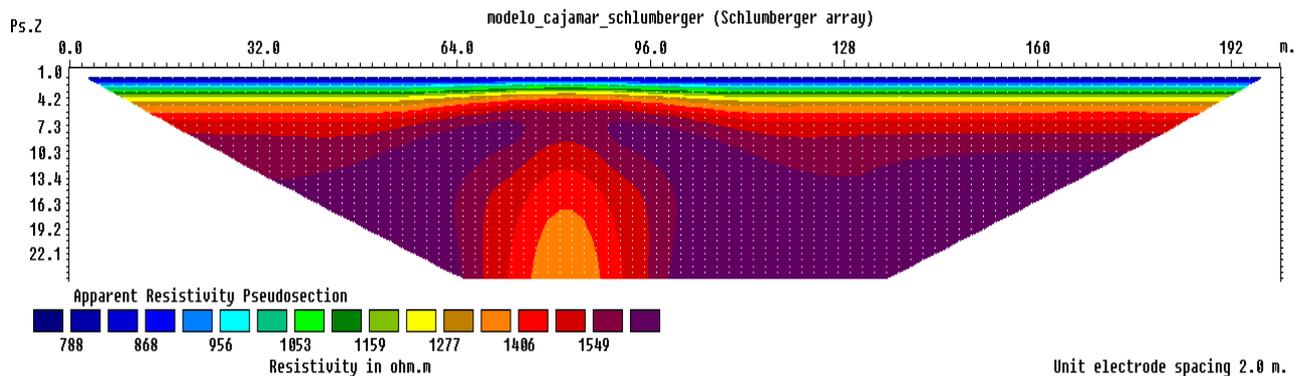


Figura 3.26: Pseudo-seção de resistividade aparente de uma região que contém uma caverna cárstica preenchida com água e ar em subsuperfície usando o arranjo Schlumberger.

Ao fazer a inversão dos dados para a caverna preenchida totalmente com água, foram obtidas imagens que mostram com boa precisão a localização da caverna cárstica. Com uma forma arredondada foi identificada uma anomalia de baixa resistividade com dimensões de comprimento e de profundidade muito próximas às reais no arranjo dipolo-dipolo. No arranjo Schlumberger temos uma informação sobre a localização da caverna e sobre o seu comprimento. A profundidade, no entanto, foi estendida além da real. Os valores das resistividades para a cobertura metarenítica, o calcário e a água se mostraram muito próximas às reais em ambos os modelos.

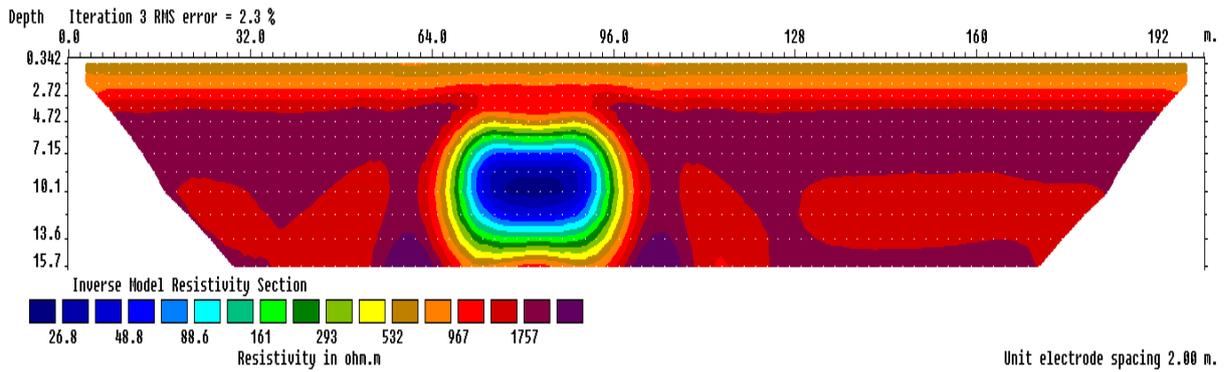


Figura 3.27: Dado invertido de modelo de uma caverna cárstica preenchida com água em subsuperfície utilizando o arranjo dipolo-dipolo.

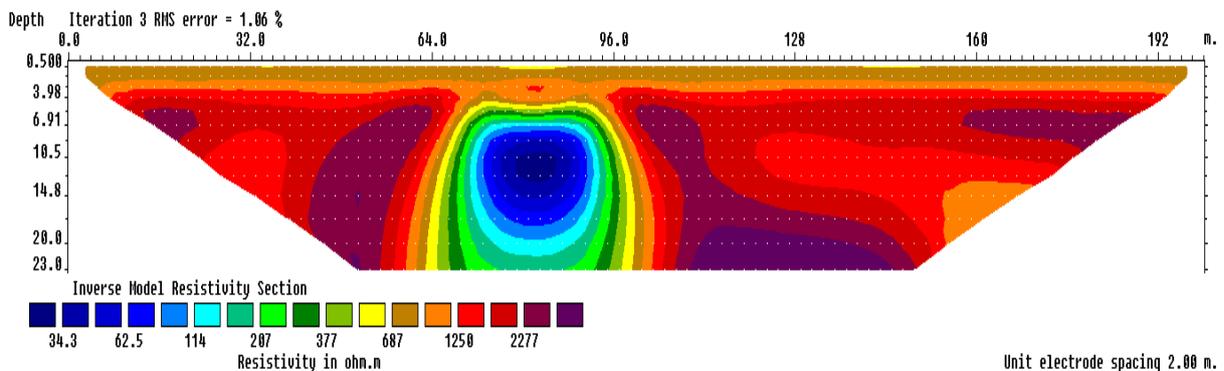


Figura 3.28: Dado invertido de modelo de uma caverna cárstica preenchida com água em subsuperfície utilizando o arranjo Schlumberger.

Com a inversão dos dados do modelo da caverna preenchida com 3/8 de água com o arranjo dipolo-dipolo foi possível verificar a existência de uma interface entre uma região de alta resistividade (mais acima) e uma de baixa resistividade (mais abaixo). Essas anomalias indicam com precisão a localização da caverna e determinar a presença do ar (altíssima resistividade) dentro da caverna juntamente com a água (baixa resistividade). Foram verificadas também pequenas anomalias de alta resistividade ao lado da zona de baixa resistividade que são deformações geradas pelo arranjo.

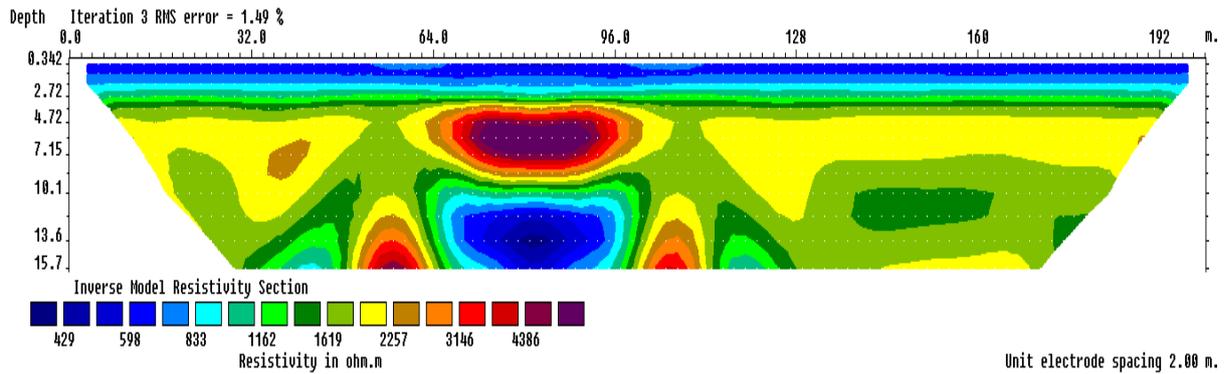


Figura 3.29: Dado invertido de modelo de uma caverna cárstica preenchida com água e ar em subsuperfície utilizando o arranjo dipolo-dipolo.

O dado invertido para o modelo de uma caverna cárstica preenchida com  $3/8$  de água utilizando o arranjo Schlumberger mostrou maiores distorções quanto às dimensões da caverna, mas também foi possível notar a interface entre o ar (alta resistividade) e a água (baixa resistividade) dentro da caverna. Os valores das resistividades da cobertura metaarenítica, do calcário e do ar foram próximas às da realidade, embora a da água apresentada foi acima da realidade com ambos os arranjos.

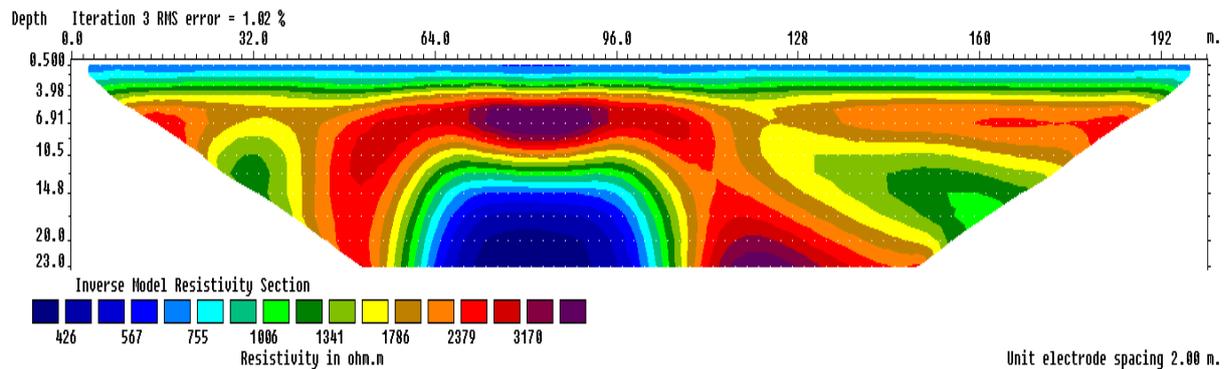


Figura 3.30: Dado invertido de modelo de uma caverna cárstica preenchida com água e ar em subsuperfície utilizando o arranjo Schlumberger.

## CAPÍTULO 4

### Conclusões

Foi possível verificar com as modelagens feitas neste trabalho que o método geoeletrico da Eletrorresistividade utilizando a técnica de multiperfilagens de resistividade obtém resultados satisfatórios para localização, mapeamento e determinação das dimensões de estruturas geológicas em subsuperfície. Foi possível verificar com clareza variações de resistividade na subsuperfície mesmo em situações onde haviam coberturas com diferentes resistividades. Algumas distorções se apresentaram devido a problemas nos arranjos tanto no dipolo-dipolo, quanto no Schlumberger.

No modelo de matacões foi possível especificar a localização lateral dos blocos, embora tenha sido um problema a diferenciação de blocos posicionados no mesmo comprimento. Algumas distorções foram notadas, devido aos arranjos, mas não representaram problemas para o fim principal que seria o mapeamento dos blocos de rocha. O que nos mostra que a engenharia pode economizar bastante ao fazer um estudo geofísico preliminar e evitar ter que perfurar esses blocos ou mudar o projeto durante a sua execução, o que provocaria mais gastos e um atraso na obra.

No modelo da falha inclinada foram obtidos resultados satisfatórios para a modelagem que foram melhorados ainda mais após ser feita a inversão dos dados. Foi possível identificar a localização, a resistividade da estrutura e sua largura com boa precisão. O único problema ocorreu na determinação do mergulho da falha, que ficou sub-vertical na seção. Sendo assim, fica mostrado que outra situação geológica que acarreta alguns problemas financeiros e que pode causar desastres nas regiões pode também ser evitado com um estudo geofísico antes de serem feitas as obras.

No modelo das cavernas cársticas foi possível identificar a localização das cavernas e o material que as estava preenchendo. Nas pseudo-seções foram identificadas anomalias indicativas da posição e composição das cavernas. Após fazer a inversão ficou muito clara a presença da caverna. O objetivo principal deste estudo, que seria o monitoramento do nível piezométrico nas cavernas foi atingido, de modo que já nas pseudo-seções de resistividade aparente é possível notar uma clara diferença da situação inicial para a situação problemática e, quando foi feita a inversão, as duas situações puderam ser muito bem diferenciadas e mapeadas satisfatoriamente, mostrando a grande diferença de uma caverna completamente preenchida com

água para uma caverna com um nível piezométrico já bem abaixo do ideal, o que acarretou o desastre em Cajamar e que, com este trabalho, ficou evidenciado que poderia ter sido evitado com um estudo geofísico de prevenção.

# Agradecimentos

Agradeço a realização deste trabalho, primeiramente a Deus e depois à minha família por todo o apoio e confiança que sempre depositaram em mim. Agradeço a minha mãe Nema e meu pai Carlos Benevides por todo o esforço para que eu conseguisse chegar até este momento. A meu filho Miguel por ser minha fonte de força e inspiração para sempre seguir em frente. A meu irmão Breno, minha tia Lene e minha vó Dulce por todo o companheirismo e força que sempre me deram nos bons e maus momentos.

Agradeço também a minha orientadora Dra. Susana Silva Cavalcanti pelos conhecimentos passados nas matérias durante o curso e pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também a meu co-orientador Italo Campelo de Souza que, além de um grande amigo, se mostrou um grande docente neste período.

Agradeço às pessoas maravilhosas que conheci na faculdade: minha namorada Janaina Assis, que é a mais recente nesse grupo, mas já é muito importante para mim por todo o amor e carinho nos momentos de alegria e nos momentos de tensão nessa reta final também, meus grandes amigos Naira, Leleco, Uilli, Diogo, Breno, Ildeson, Dett, Marcus e Radesh, amizades que espero levar pelo resto da vida comigo. Daniel, Sotero, Ravel, Michelle, Gilmário, Pablo, Diego Costa, Paulo Rodrigo, Currálinho, Mateus, Herbert, Yves e Adriano, pessoas que foram muito importantes caminhando juntamente comigo durante esses anos também.

Agradeço a meus amigos de fora da faculdade, que sempre foram importantes dividindo alguns dos melhores momentos de minha vida e para sempre ficarão marcados em minha vida, Vinícius Romão, Mateus Viana, Rafael, Ricardinho, Matheus Militão, Igor, Rodrigo, Dominguez, Hima, Funai, Victinho, Pêka e Pedrosa.

Agradeço aos professores que com seus conhecimentos ajudaram e tornar o garoto do começo do curso no profissional que sai hoje da faculdade. Agradeço ainda aos funcionários que também ajudaram a tornar esse momento possível, em especial Dona Ana D'O, por estar sempre disponível para atender aos pedidos desesperados.

# Referências

- Antonellini, M. A. Aydin, A. (1994) Effects of faulting on fluid flow in porous sandstones: Petrophysical properties, **78**:355–377.
- Archie, G. E. (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, **146**:54–67.
- Aydin, A. Johnson, A. M. (1988) On the formation and growth of faults, an experimental study, **10**:413–430.
- Castro, G. Carvalho, D. Machado, R (2013) Aplicação da Eletrorresistividade na avaliação de viabilidade de empreendimentos imobiliários.
- Cowie, P. A. Scholz, C. H. (1992) Physical explanation for the displacement-length relationship of faults using a post-yield fracture mechanics model, **14**:1149–1156.
- Cox, S. D. J. Scholz, C. H. (1978) Development of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstones, **116**:931–942.
- deGroot-Hedlin, C. Constable, S. (1990) Occam's inversion to generate smooth two-dimensional models from magnetotelluric data, **12**:1613-1624
- Dey, A. Morrison, H. F. (1979) Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures, **27**:1020-1036
- Johansen, T. E. Fossen, H. (2008) Internal geometry of fault damage zones in interbedded siliciclastic sediments, **299**:35–56.
- Kearey, P. Brooks, M. Hill, I. (2009) Geofísica de Exploração, Oficina de Textos, Brasil.
- Kolyukhin, D., S. S. E. M. S. Fossen, H. (2010) Deformation band population in fault damage zone-impact on fluid flow., **14**:231–248.
- Loke, M. H. (1994) The inversion of two-dimensional apparent resistivity data.
- Sasaki, Y. (1992) Resolution of resistivity tomography inferred from numerical SIMULATION.
- Sato, H. K. (2002) Notas de Aula de Métodos elétricos.
- Shipton, Z. K. Cowie, P. (2003) A conceptual model for the origin of fault damage zone structures in high-porosity sandstones, **25**:333–444.
- Souza, I. C. de. (2013) Modelagens Geométricas Bidimensionais de Zonas de Danos de Falhas em Reservatórios de Alta Porosidade.

- Telford, W. M., G. L. P. Sheriff, R. E. (1990) *Applied Geophysics*, Cambridge Un. Press, Cambridge.
- Vermilye, J. M. Scholz, C. H. (1998) The process zone: a microstructural view, **103**:12223–12237.