



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DAVI ALEX LIMA AZEVEDO**

**PROPOSTA DE INSTRUÇÃO TÉCNICA PARA DETERMINAÇÃO DE  
PSEUDOSEÇÕES DE TOMOGRAFIA ELETRORRESISTIVA COM ARRANJO  
DIPOLO-DIPOLO: PLANEJAMENTO, EXECUÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS**

**FORTALEZA**

**2026**

DAVI ALEX LIMA AZEVEDO

PROPOSTA DE INSTRUÇÃO TÉCNICA PARA DETERMINAÇÃO DE  
PSEUDOSEÇÕES DE TOMOGRAFIA ELETRORRESISTIVA COM ARRANJO  
DIPLO-DIPOLO: PLANEJAMENTO, EXECUÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Ceará, como  
requisito à obtenção do título de bacharel  
em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mariana Vella  
Silveira.

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A986p Azevedo, Davi Alex Lima.  
Proposta de instrução técnica para determinação de pseudoseções de tomografia eletrorresistiva com arranjo dipolo-dipolo : planejamento, execução e tratamento de dados / Davi Alex Lima Azevedo. – 2026. 76 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2026.  
Orientação: Profa. Dra. Mariana Vella Silveira.

1. Execution Procedure. 2. ERT. 3. Pseudosection. I. Título.

CDD 620

---

DAVI ALEX LIMA AZEVEDO

PROPOSTA DE INSTRUÇÃO TÉCNICA PARA DETERMINAÇÃO DE  
PSEUDOSEÇÕES DE TOMOGRAFIA ELETRORRESISTIVA COM ARRANJO  
DIPLO-DIPOLO: PLANEJAMENTO, EXECUÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Ceará, como  
requisito à obtenção do título de bacharel  
em Engenharia Civil.

Aprovada em: 26/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Mariana Vella Silveira (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Natureza.

A toda beleza que existe no Mundo.

## **AGRADECIMENTOS**

À Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Mariana VellaSilveira, pela excelente orientação, pela boa vontade e, principalmente, pela paciência.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Alfran Sampaio Moura e Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

À Universidade Federal do Ceará por toda a jornada de amadurecimento que trilhei neste lugar.

À RochaBrasil Engenharia, pelo fomento.

Ao Loran Honório, pelo apoio, dicas e reflexões

"A geofísica é a arte de interpretar medições físicas em termos de estruturas geológicas." (SHERIFF, 1989)

## RESUMO

A investigação de subsuperfície é uma etapa crítica na engenharia geotécnica, e a Tomografia Eletroresistiva (ERT) se destaca como um método eficiente para o imageamento da subsuperfície. No entanto, a diversidade de metodologias pode levar à subjetividade na coleta de dados e a inconsistências nos procedimentos de campo. Este estudo visa padronizar a execução de levantamentos de ERT através do desenvolvimento de uma Instrução Técnica e de um Boletim de Campo, especificamente adaptados para o arranjo dipolo-dipolo. A metodologia fundamentou-se em uma revisão sistemática de normas técnicas, tais como a ASTM D6431-18 e as diretrizes da ABGE, além da literatura científica existente a respeito do tema, seguida pelo estabelecimento de premissas simplificadoras para agilizar o planejamento e a execução dos ensaios. A Instrução Técnica resultante fornece um guia para a determinação do espaçamento entre eletrodos e boas práticas de campo voltadas a mitigar erros de leitura. O Boletim de Campo serve como uma interface padronizada para a transmissão de dados entre as equipes de planejamento e execução, garantindo a rastreabilidade das informações. Os resultados indicam que os documentos propostos contribuem para a confiabilidade e reprodutibilidade dos dados geofísicos, fornecendo uma ferramenta prática e objetiva para a geotecnia.

**Palavras-chave:** Procedimento Executivo; ERT; Pseudoseção.

## **ABSTRACT**

Subsurface investigation is a critical stage in geotechnical engineering, and Electrical Resistivity Tomography (ERT) stands out as an efficient method for subsurface imaging. However, the diversity of methodologies may lead to subjectivity in data acquisition and inconsistencies in field procedures. This study aims to standardize the execution of ERT surveys through the development of a Technical Instruction and a Field Log, specifically adapted for the dipole–dipole array. The methodology was based on a systematic review of technical standards, such as ASTM D6431-18 and ABGE guidelines, as well as the existing scientific literature on the subject, followed by the establishment of simplifying assumptions to streamline test planning and execution. The resulting Technical Instruction provides guidance on electrode spacing design and field best practices aimed at mitigating reading errors. The Field Log serves as a standardized interface for data transfer between planning and execution teams, ensuring information traceability. The results indicate that the proposed documents contribute to the reliability and reproducibility of geophysical data, providing a practical and objective tool for geotechnical engineering.

**Keywords:** Execution Procedure; ERT; Pseudosection.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquematização da seção de um condutor.....	8
Figura 2	Esquematização do ensaio com quatro eletrodos.....	10
Figura 3	Esquematização do arranjo dipolo-dipolo.....	11
Figura 4	Esquematização do caminhamento elétrico.....	12
Figura 5	Exemplo de pseudoseção de ERT.....	13
Figura 6	Fluxograma da Metodologia.....	18
Figura 7	Modelo de pseudoseção proposto por Hallof.....	21
Figura 8	Fluxograma do Procedimento executivo.....	29
Figura 9	Lóbulos de sensibilidade do arranjo dipolo-dipolo.....	30

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Relação de materiais e suas respectivas resistividades.....	8
Quadro 2	Relação entre nível de investigação e a profundidade de investigação.....	22
Quadro 3	Parâmetros e nomenclaturas a serem incluídos no boletim de campo.....	28

## SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACÕES

A – Eletrodo de injeção de corrente

B – Eletrodo de injeção de corrente

CPTU – *Cone Penetration Test*

ERT – Tomografia Eletrorresistiva (*Electrical Resistivity Tomography*)

I – Corrente elétrica

L – Comprimento do ensaio

L' – Comprimento preliminar do ensaio

M – Eletrodo de medição de potencial

N – Eletrodo de medição de potencial

ne – Número de eletrodos a serem utilizados no ensaio

PE – Ponto de referência do ensaio

PF – Ponto final do ensaio

PI – Ponto inicial do ensaio

R – Resistência elétrica

RCPT – *Resistive Cone Penetration Test*

RMS – *Root Mean Square* (erro quadrático médio)

SPT – Sondagem de simples reconhecimento com SPT (*Standard Penetration Test*)

U – Tensão elétrica (voltagem)

UTM – Sistema de georreferenciamento Universal Transversa de Mercator

V – Tensão induzida

V<sub>0</sub> – Tensão espontânea

ΔL – Espaçamento entre eletrodos

n – Nível da investigação

Ω – Indica a posição dos eletrodos de injeção no processo de caminhamento elétrico

ρ – Resistividade elétrica

ρ<sub>A</sub> – Resistividade aparente

Ω·m – Ohm·metro (unidade de resistividade elétrica)

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>2</b>
1.1. Justificativa.....	2
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>4</b>
1.2.1. Objetivos Gerais.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
<b>2. Fundamentação Teórica.....</b>	<b>5</b>
2.1. Investigação Geotécnica.....	5
2.2. Investigação Geofísica.....	6
2.3. Ensaios eletrorresistivos.....	6
2.3.1 Resistividade Elétrica.....	7
2.3.2 Tomografia Eletrorresistiva.....	9
2.3.3 Geometria dos arranjos.....	9
2.3.4 Arranjo dipolo-dipolo.....	11
2.3.5 Caminhamento elétrico.....	12
2.3.6 Pseudoseção de ERT.....	12
2.3.6 Normas vigentes.....	13
2.4. Aplicações práticas de ERT's.....	13
<b>3. Metodologia.....</b>	<b>15</b>
3.1. Síntese da literatura estabelecida.....	15
3.2. Estabelecimento de premissas.....	16
3.3. Desenvolvimento dos documentos propostos.....	16
3.3.1 Instrução Técnica.....	16
3.3.2 Boletim de campo.....	17
3.4. Esquematização da Metodologia.....	17
<b>4. Resultados e Discussão.....</b>	<b>19</b>
4.1. Premissas adotadas.....	20
4.2. Procedimento Executivo.....	20
4.2.1 Planejamento do ensaio.....	20
4.2.1.1 Determinação do espaçamento dos eletrodos.....	21
4.2.1.2 Determinação do comprimento da linha de caminhamento elétrico.....	22
4.2.1.3 Determinação do número de eletrodos.....	23
4.2.1.4 Determinação da posição da linha de caminhamento.....	23
4.2.2 Execução em campo.....	23
4.2.2.1 Materiais do ensaio de campo.....	24
4.2.2.2 Preparação do solo e cravação dos eletrodos.....	24
4.2.2.3 Teste de contato dos eletrodos.....	25
4.2.2.4 Caminhamento Elétrico.....	26
4.2.2.5 Redução de ruído.....	26
4.2.2.6 Coleta de dados planialtimétricos.....	27
4.2.3 Tratamento preliminar dos dados.....	27
4.3. Boletim de Campo.....	28

4.4 Esquematização do Procedimento Executivo.....	29
<b>4.5. Considerações Finais.....</b>	<b>30</b>
4.5.1. Fundamentação das escolhas metodológicas.....	30
4.5.2. Confiabilidade dos parâmetros selecionados.....	31
<b>5. Conclusão.....</b>	<b>32</b>
<b>6. Referências Bibliográficas.....</b>	<b>33</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>37</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>38</b>

## **1. Introdução**

### **1.1. Justificativa**

A geotecnia é a aplicação do método científico e dos princípios da engenharia para a aquisição, interpretação e uso de conhecimento de materiais da crosta terrestre para a solução de problemas de engenharia (Neuendorf et al., 2005). Por definição, a geotecnia é fundamental para a engenharia civil e diversas outras áreas, sendo aplicável na prospecção de matérias-primas e no entendimento do solo como um meio cujas propriedades podem ser aproveitadas.

De maneira similar à geotecnia, a geofísica é o estudo de propriedades físicas do solo, para determinar características ou a natureza de seus componentes (Telford; Geldart; Sheriff, 1990). As propriedades que podem ser exploradas por uma investigação geofísica incluem massa específica, a condutividade elétrica e a influência do magnetismo nos materiais, entre outras (Kearey, 2002). A integração de ensaios geofísicos no processo de investigação geotécnica acrescenta ferramentas para a aquisição e interpretação do conhecimento de propriedades do solo.

Dentre os métodos geofísicos, a eletrorresistividade destaca-se pela capacidade de mapear propriedades elétricas na subsuperfície, permitindo inferir parâmetros como umidade, granulometria e o nível do lençol freático (Kearey et al., 2002). Essa técnica baseia-se na injeção de corrente elétrica e na medição dos potenciais resultantes para determinar a resistividade aparente (Stummer, 2003), podendo ser aplicada na localização de aquíferos (Garcia, 2019) e reservas minerais (Aminzadeh, 2015). Para a geotecnia, a Tomografia Eletrorresistiva (ERT) se sobressai por gerar seções transversais do terreno (Telford; Geldart; Sheriff, 1990).

Diferentes metodologias podem ser empregadas na execução de uma ERT, por exemplo, existem diferentes arranjos geométricos para os eletrodos. Stummer (2003) aponta para a existência de pelo menos 7 diferentes configurações: Wenner, Schlumberger simétrico, Schlumberger assimétrico, dipolo-dipolo, dipolo-polo, polo-polo e gradiente.

A diversidade de métodos, apesar de explicitar a versatilidade deste tipo de ensaio, suscita a necessidade de um guia executivo para a obtenção de pseudoseções de ERT, com o objetivo de padronizar a aplicação em campo e

garantir a reprodutibilidade e a documentação adequada dos resultados obtidos, além de reduzir a possibilidade de erros ocasionados por inadequação metodológica. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um procedimento executivo para sanar a necessidade apontada, para tal foi definido um método com base nos tipos de ensaio mais adequados para a obtenção de uma pseudoseção de ERT.

Loke (2000) aponta o arranjo dipolo-dipolo como uma configuração adequada para a aquisição de seções de ERT, em virtude de sua maior sensibilidade às variações laterais e penetração no solo. Para viabilizar a construção dessas seções, é necessária a execução de uma série de leituras ao longo de um perfil, o que pode ser operacionalizado pelo caminhamento elétrico. Este método consiste na realização de leituras consecutivas e sistemáticas, variando a posição dos eletrodos para compor a ERT (ABGE, 2023b).

Os dados brutos coletados no caminhamento elétrico podem ser organizados na forma de uma pseudoseção, que consiste numa representação visual das resistividades aparentes obtidas (Loke, 2000). Embora a pseudoseção seja um resultado intermediário, ela é indispensável para a aplicação de modelos de inversão, que convertem dados de resistividade aparente na seção invertida (Kumar et al., 2023). Portanto, a precisão dessa representação preliminar garante que o modelo invertido reflita com fidelidade as condições geológicas e geotécnicas do local investigado.

Desta forma, uma Instrução Técnica, aliada a documentos complementares, foi elaborada com foco no caminhamento elétrico e no arranjo dipolo-dipolo, em virtude de sua adequada aplicação para a obtenção de pseudoseções de ERT, buscando padronizar os procedimentos de campo e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos. Este documento foi elaborado com foco em investigações geofísicas rasas, com profundidade máxima de 40 metros, complementares à geotecnia, executadas com enfoque na estratigrafia, com o fim de desenvolvimento de fundações superficiais.

## **1.2. Objetivos**

Com base nas justificativas propostas, foram elaborados objetivos para atender às necessidades propostas.

### **1.2.1. Objetivos Gerais**

Desenvolver uma proposta de Instrução Técnica para a obtenção de pseudoseções de ERT da subsuperfície do solo, voltada à aplicação em campo, baseando-se no caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo. Este método de ensaio deverá ser limitado a aplicações rasas, associadas a investigações estratigráficas, complementares às investigações geotécnicas convencionais.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral, foi levantada uma sequência de metas específicas:

- Sintetizar os conceitos fundamentais da Eletrorresistividade e simplificá-los numa Instrução Técnica com a função de orientar o planejamento do ensaio, através de uma consulta a documentos disponíveis na literatura;
- Estabelecer premissas para simplificar o desenvolvimento do procedimento executivo;
- Adotar estrutura baseada em normas estabelecidas e consolidadas;
- Desenvolver um protocolo de ensaio de campo, esta metodologia deve aplicar os parâmetros determinados no planejamento do ensaio;
- Elaborar boletins e outros documentos que possam ser utilizados como apoio na execução do ensaio de campo.

## **2. Fundamentação Teórica**

Este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos fundamentais para a elaboração de uma pseudoseção de ERT, apresentando informações que irão nortear o entendimento da elaboração da Instrução Técnica.

### **2.1. Investigação Geotécnica**

Geotecnia é a aplicação do método científico e de princípios da engenharia para fazer a aquisição, interpretação e uso de conhecimento de materiais da crosta terrestre para a solução de problemas de engenharia. A geotecnia engloba conceitos como a mecânica dos solos e das rochas, além de muitos aspectos da geologia, hidrologia e geofísica (Neuendorf et al., 2005).

As investigações geotécnicas consistem em explorações e análises de campo e laboratório do solo e são fundamentais para a geotecnia, sendo necessárias para a aquisição de informações que podem ser utilizadas em projetos de fundação e de obras de terra (Terzaghi et al., 1996).

A investigação geotécnica requer um estudo preliminar, um planejamento técnico, execução de ensaios, tanto de campo quanto de laboratório e por fim a interpretação de dados e elaboração de um modelo geotécnico (Tommasi, 2005).

O método de investigação geotécnica mais usado é a sondagem de simples reconhecimento com SPT, padronizado na norma ABNT NBR 6484:2020, outras técnicas, como o Ensaio de Penetração de Cone com Medida de Poropressão - CPTU são apresentados na NBR ABNT NBR 6122:2019 — Projeto e execução de fundações. O SPT fornece as seguintes informações: tipos de solos e suas respectivas profundidades de ocorrência; indicação da posição do nível de água (quando ocorrer) durante a execução de cada sondagem, e o índice de resistência à penetração N a cada metro (ABNT, 2020a).

A investigação geotécnica pode incluir também os ensaios geofísicos, que utilizam propriedades físicas dos materiais, tais como magnetismo, massa específica e decaimento radiativo para determinar informações sobre os componentes da subsuperfície (Telford; Geldart; Sheriff, 1990).

## **2.2. Investigação Geofísica**

A investigação geofísica é definida como a prospecção de características físicas do solo para determinar as suas propriedades e as de seus componentes (Telford; Geldart; Sheriff, 1990). Os dados obtidos através da investigação geofísica podem complementar as investigações geotécnicas convencionais (Aminzadeh, 2015).

Os métodos geofísicos podem ser divididos em duas categorias, os que medem propriedades espontâneas dos materiais do solo e os que medem a resposta destes materiais a estímulos (Kearey, 2002).

Métodos baseados em propriedades espontâneas são aqueles fundamentados nas medições dos campos naturais da Terra, e são conhecidos como métodos naturais (Kearey, 2002). Campos naturais da terra incluem o gravitacional, o magnético e o elétrico (Sheriff, 1989).

Os métodos artificiais trabalham também com os campos naturais da Terra, contudo, a metodologia consiste em perturbá-los com equipamentos específicos e medir a resposta apresentada (Kearey, 2002). Alguns exemplos de métodos artificiais incluem: o método magnético; a inversão polarizada; o método sísmico e os métodos eletrorresistivos (Sheriff, 1989).

Uma importante possibilidade na investigação geofísica é a localização de anomalias na subsuperfície, neste âmbito, a eletrorresistividade ganha destaque (Kearey, 2002). Os métodos eletrorresistivos são aqueles que medem variações do campo elétrico ocasionadas pela indução de correntes elétricas no solo (Stummer, 2003).

## **2.3. Ensaio eletrorresistivos**

O interesse pela eletrorresistividade se iniciou com os trabalhos de Wenner em 1915, quando este desenvolveu um método de 4 eletrodos para realizar medições de propriedades elétricas do solo (Wenner, 1915 *apud* Stummer, 2003). Desde os trabalhos de Wenner, foram desenvolvidos novos métodos tanto de ensaio, como de análise dos dados com fins geotécnicos (Stummer, 2003).

O entendimento do funcionamento dos ensaios eletroresistivos parte da apresentação de alguns conceitos fundamentais da geotecnia e da eletrodinâmica, que serão tratados nesta seção.

### 2.3.1 Resistividade Elétrica

Para entender a resistividade elétrica, é necessário abordar a resistência elétrica e a relação existente entre ambos os conceitos. A resistência elétrica é uma propriedade definida pela primeira lei de Ohm, e é definida como a relação linear entre a diferença de potencial aplicada e a corrente elétrica criada como resposta (Tipler; Mosca, 2009). A primeira Lei de Ohm está descrita na Equação 1.

$$R = \frac{U}{I}$$

(Eq. 01)

Na Equação 1, a Resistência (R) é medida em ohms ( $\Omega$ ), e é proporcional à Tensão (U), medida em Volts (V), e inversamente proporcional à corrente (I), que é medida em Ampéres (A).

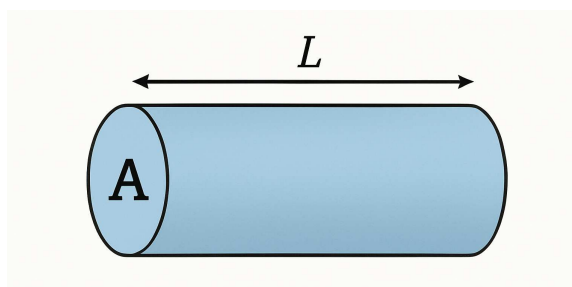
A Resistência Elétrica, por sua vez, é determinada com base na geometria do condutor e na sua resistividade elétrica, sendo esta definida pela segunda lei de Ohm (Halliday, 2016), tal lei é descrita na Equação 2:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L}$$

(Eq. 02)

A Equação 2 define a resistividade, representada pela letra grega  $\rho$  em ohms vezes metros, como a resistência vezes a área da seção do condutor, A, em metros quadrados, dividida pelo seu comprimento, L, em metros. A Figura 1 representa esquematicamente a área A e o comprimento L de um condutor.

Figura 1 - Esquemática da seção de um condutor



Fonte: Elaborado pelo autor

A resistividade é uma grandeza física característica do tipo de material, o Quadro 1 apresenta os valores típicos de resistividade elétrica para alguns materiais do cotidiano (ABNT, 2020b).

Quadro 1 - Relação de materiais e suas respectivas resistividades

<b>Tipos de materiais</b>	<b>Faixa de resistividades (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>
Água do Mar	Menor que 10
Alagadiço, limo, húmus, lama	Até 150
Água destilada	300
Argila	300 a 5000
Calcário	500 a 5000
Areia	1000 a 8000
Granito	1500 a 10000
Basalto	A partir de 10000
Concreto	Molhado: 20 a 100 Umido: 300 a 1000 Seco: 3000 a 2000000

fonte: (ABNT, 2020b, adaptado pelo autor)

A resistividade elétrica do solo pode ser determinada de diversas maneiras, como em ensaios de laboratório com amostras deformadas (Aquino, 2010), ou métodos indiretos, como em ensaios de campo em pontos amostrais na subsuperfície (Telford; Geldart; Sheriff, 1990). Uma das possibilidades do método eletrorresistivo é a elaboração de seções tomográficas da subsuperfícies, num método conhecido como tomografia eletrorresistiva, ou ERT (do inglês, *Electro Resistivity Tomography*) (Telford; Geldart; Sheriff, 1990).

### 2.3.2 Tomografia Eletrorresistiva

A ERT é uma metodologia de ensaio que emprega conceitos da Geofísica para determinar o comportamento eletrorresistivo de vários pontos ao longo do subsolo (Sheriff, 1989).

Os dados obtidos por meio de uma ERT permitem a elaboração de modelos bidimensionais, ou tridimensionais do subsolo que representam o comportamento elétrico de suas camadas (Telford; Geldart; Sheriff, 1990). Um modelo elaborado por meio de uma ERT do subsolo pode ser utilizado para identificar propriedades como heterogeneidades, interfaces geológicas, cavidades, zonas de saturação, contaminação e anomalias geotécnicas (Sheriff, 1989).

Os dados para a elaboração de um modelo bidimensional podem ser obtidos de diferentes formas, por exemplo, existem diversas geometrias de arranjos que podem ser adotadas para a elaboração de uma ERT (Stummer, 2003).

### 2.3.3 Geometria dos arranjos

Wenner e Schlumberger propuseram arranjos de ensaio com quatro eletrodos, sendo dois eletrodos de injeção de corrente e outros dois eletrodos de medição de potencial elétrico (Wenner, 1915; Schlumberger, 1913 *apud* Sheriff, 1989).

Partindo da suposição de que o solo seja um material semi-infinito, de propriedades elétricas homogêneas, a diferença de potencial elétrico entre os dois eletrodos de medição na superfície será dada conforme a Equação 3 (Telford; Geldart; Sheriff, 1990).

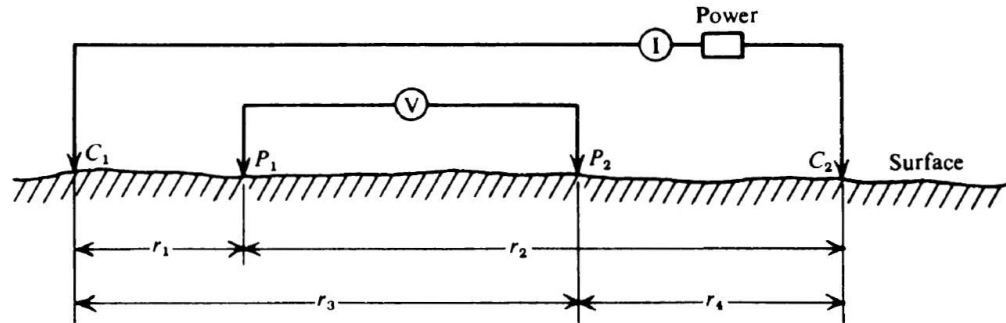
$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}$$

(Eq. 03)

Onde I representa o valor da corrente medida entre os eletrodos de injeção, e  $\rho$  a resistividade elétrica do solo na seção compreendida entre os dois eletrodos de

medição, já  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  e  $r_4$  representam as distâncias entre os eletrodos, estas distâncias estão esquematizadas na Figura 2:

Figura 2 - Esquematização do ensaio com quatro eletrodos.



fonte: (Telford; Geldart; Sheriff, 1990)

Na Figura 2,  $V$  e  $I$  representam instrumentos de medição de potencial e corrente, respectivamente,  $P_1$  e  $P_2$  representam terminais de medição de potencial e  $C_1$  e  $C_2$  representam terminais de injeção de corrente proveniente da fonte, representada pela indicação “Power”, é importante ressaltar que a corrente injetada pode viajar teoricamente por todo o maciço de solo (Telford; Geldart; Sheriff, 1990). A Equação 3 pode ser reformulada, a fim de evidenciar a resistividade, tendo como resultado a Equação 4.

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \frac{1}{\left\{ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left( \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}}$$

(Eq. 04)

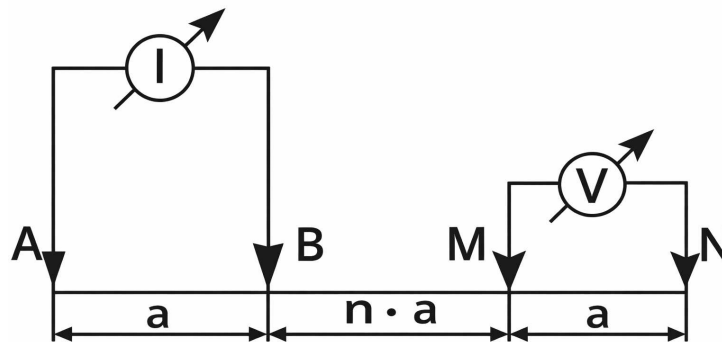
A Equação 4 permite calcular o valor da resistividade aparente de qualquer ensaio de 4 eletrodos (Stumer, 2003). Um dos tipos de ensaio em que são utilizados 4 eletrodos é o arranjo dipolo-dipolo (Halhof, 1957).

### 2.3.4 Arranjo dipolo-dipolo

Dentre as configurações de ensaios eletroresistivos com 4 eletrodos, o arranjo dipolo-dipolo apresenta maior sensibilidade às variações laterais de resistividade elétrica, tornando-o o mais adequado para a elaboração de seções de ERT (Loke, 2000).

No arranjo dipolo-dipolo, os dois eletrodos de medição são posicionados consecutivamente aos dois eletrodos de injeção de corrente (Stummer, 2003), a Figura 3 esquematiza o arranjo dipolo-dipolo.

Figura 3 - Esquematização do arranjo dipolo-dipolo.



Fonte: (Stummer, 2003).

No arranjo dipolo-dipolo, especificamente, os terminais de injeção de corrente são referidos como A e B, enquanto a leitura da tensão induzida é efetuada pelos terminais M e N. A distância entre A e B, no arranjo dipolo-dipolo é igual à distância entre M e N, que na Figura 3 é referida como  $a$ , e a distância entre B e M deve ser um múltiplo inteiro  $n$  da distância  $a$  (Stummer, 2003).

Aplicando na Equação 4 as relações entre as distâncias do arranjo dipolo-dipolo, é possível elaborar a Equação 5, que permite calcular a resistividade aparente do solo nesta configuração.

$$\rho = \pi n(n + 1)(n + 2)a \frac{V}{I}$$

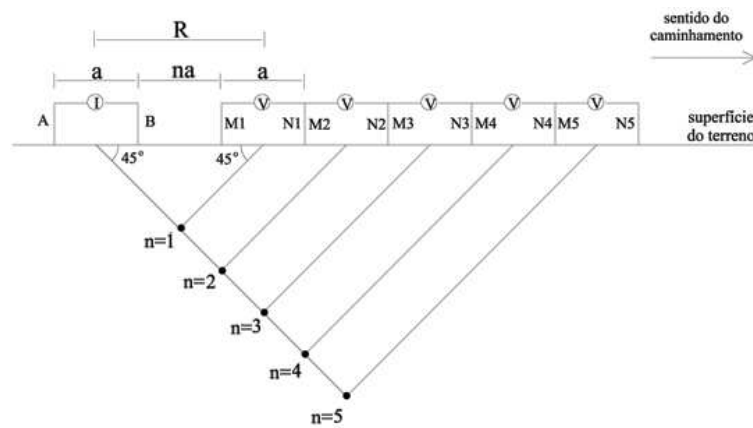
(Eq. 05)

A aplicação do arranjo dipolo-dipolo na investigação geofísica pode ser sistematizada através do caminhamento elétrico (ABGE, 2023b).

### 2.3.5 Caminhamento elétrico

A execução do caminhamento elétrico consiste em leituras consecutivas de resistividade elétrica ao longo de uma linha, variando o espaçamento dos eletrodos (ABGE, 2023b). Para o arranjo dipolo-dipolo, o caminhamento elétrico pode ser feito aplicando sucessivas leituras, incrementando o valor de  $n$ . A Figura 4 esquematiza o caminhamento elétrico.

Figura 4 – Esquematização do caminhamento elétrico



Fonte: (GANDOLFO; GALLAS, 2007).

Os dados obtidos por meio do caminhamento elétrico executado por meio do arranjo dipolo-dipolo podem ser apresentados na forma de uma pseudoseção de ERT (Loke, 2000).

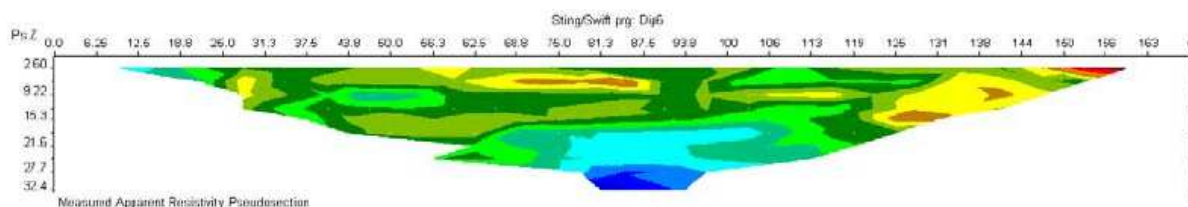
### 2.3.6 Pseudoseção de ERT

A pseudoseção consiste na representação visual das resistividades aparentes e desempenha um papel intermediário entre a execução em campo e o resultado final, sendo utilizada também para calcular o erro quadrático médio da medição (ABGE, 2023b).

Uma pseudoseção pode ser elaborada posicionando a resistividade aparente calculada em uma medição, no ponto médio do ensaio na direção horizontal e, verticalmente, em um alinhamento a um ângulo de  $45^\circ$  saindo do ponto médio entre

A e B (Hallof, 1957)0. A Figura 4 ilustra a posição do ponto de resistividade aparente, enquanto a Figura 5 exemplifica uma pseudoseção de ERT.

Figura 5 – Exemplo de pseudoseção de ERT.



Fonte: (Hameda, 2013)

### 2.3.6 Normas vigentes

As principais normas existentes acerca dos ensaios eletrorresistivos são a ABGE 202/2023: *Investigações geofísicas em terra – métodos elétricos*. e a ABNT NBR 7117-1:2020 - *Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos — Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geométrica*. Normas internacionais incluem as americanas ASTM D6431-18: *Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation*. e IEEE Std 81 — *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*.

Observa-se, entretanto, que, embora essas normas estabeleçam diretrizes importantes para a condução de medições elétricas no solo e para a interpretação geométrica, elas não detalham, de maneira específica, procedimentos executivos voltados à obtenção de pseudoseções por Tomografia Eletrorresistiva (ERT). Nesse contexto, tornam-se relevantes iniciativas que busquem organizar e sistematizar práticas já adotadas em campo, contribuindo para maior uniformidade metodológica e confiabilidade dos resultados obtidos nesse tipo de investigação.

### 2.4. Aplicações práticas de ERT's

A fim de investigar causas e apontar soluções para problemas de colapso estrutural na cidade de Lagos, na Nigéria, foram executados mais 8 transectos, com 315 metros de comprimento, espaçamento de 5 metros e 64 eletrodos cada. Os ensaios eletroresistivos foram acompanhados de 3 ensaios de cone penetrométrico

(CPTU) e um ensaio de penetração padrão (SPT). Foi determinado que o solo possui uma espessa camada de materiais de baixa resistividade elétrica, da ordem de 2,40 Ohms a 18 Ohms, estendendo-se de 5,7m a 26,7m ao longo de todos os transectos (Ayolabi, 2012).

Em ambos os bancos do rio Raszynka, juntamente à execução de ensaios de cone penetrométrico resistivo (RCPT), foram conduzidos ensaios para a obtenção de seções ERT, no banco norte, foi aplicado um arranjo Schlumberger, juntamente com um arranjo do tipo gradiente, já no banco sul foi aplicado apenas um arranjo Schlumberger, em todos os casos foram utilizados 21 eletrodos com espaçamentos de 1 metro entre si. A aplicação de uma ERT associada a outro método eletrorresistivo permitiu a comparação entre os resultados obtidos, e com esta comparação, foi possível demonstrar a efetividade de uma seção ERT em prever mudanças de camadas em um solo (Kowalczyk, 2017).

Com a aplicação de imageamento por resistividade elétrica e por indução polarizada, foi possível determinar a arquitetura da interface entre a camada sedimentar hiporreica e do leito rochoso. Foi possível determinar a existência de ondulações e um possível paleocanal no topo da camada rochosa de calcário (Rucker et al., 2021).

Em uma avaliação do uso de ERT e GPR no mapeamento de feições cársticas na região de platôs Yunnan-Guizhou, no sudeste asiático, onde 41% do terreno é composto por rochas carbonáticas, foram executadas duas ERT na crista de taludes de corte íngremes, por ocasião obras rodoviárias. Foram utilizados 48 eletrodos em cada ensaio, com espaçamentos de 0,3 metros para um e 0,5 metros para o outro, os perfis foram executados com caminhamento elétrico em arranjos dipolo-dipolo. A aplicação desta metodologia evidenciou que a seção ERT é adequada para a identificação de dolinas rasas em forma de funil ou fraturas alargadas preenchidas por solos, uma vez que a imagem de ERT fornece um grande contraste na resistividade dos solos em relação à da rocha (Tao et al., 2022)

### **3. Metodologia**

Diante da necessidade de otimizar a execução de pseudoseções de ERT's, foi feita uma busca de metodologias executivas, que foram selecionadas, simplificadas e compiladas em uma Instrução Técnica elaborada com foco em investigações geofísicas rasas, com profundidade máxima de 40 metros, complementares à geotecnia, executadas com enfoque na estratigrafia, com o fim de desenvolvimento de fundações superficiais, fundamentada em materiais normativos e literatura científica disponíveis a respeito do tema.

#### **3.1. Síntese da literatura estabelecida**

O desenvolvimento da Instrução Técnica de execução da pseudoseção de ERT consistiu na coleta, compilação e organização de conceitos de eletrorresistividade essenciais para a elaboração deste tipo de ensaio, visando padronizar e facilitar o tratamento de dados para análises geotécnicas.

Para a fundamentação teórica e seleção de etapas metodológicas, foi realizada uma busca de artigos e trabalhos acadêmicos nas bases de dados de Repositórios Institucionais, Google Scholar, SciELO e ResearchGate, além de normas e publicações da ASTM (American Society for Testing and Materials), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR) e da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE).

A busca foi realizada através das palavras-chave (em português e em inglês): “eletrorresistividade”, “ERT”, “pseudoseção”, “geofísica”, “tomografia eletrorresistiva”, “caminhamento elétrico”, “dipolo-dipolo”, e “execução”, todas seguidas do operador booleano “AND” seguido do termo engenharia.

Foram selecionados artigos acadêmicos, livros e normas que apresentam aplicações em campo de ensaios de ERT e o detalhamento nas etapas de planejamento, execução, ou elaboração de ERT's e de pseudoseções. Também foram consultados trabalhos citados nas referências dos documentos selecionados para análises.

### **3.2. Estabelecimento de premissas**

Com base nos procedimentos identificados na literatura, foram estabelecidas premissas com a função de simplificar a elaboração do procedimento executivo, especialmente reduzindo variáveis e simplificando as equações a serem adotadas.

### **3.3. Desenvolvimento dos documentos propostos**

A partir do levantamento obtido, as informações coletadas foram divididas em dois blocos principais, que deram origem a duas etapas executivas. A primeira etapa trata de parâmetros e informações sobre os ensaios, que precisam ser determinadas previamente, esta etapa foi denominada de planejamento. A segunda etapa elenca o passo a passo executivo em campo e as boas práticas necessárias para mitigar riscos e incertezas nas leituras, esta parte foi nomeada de execução em campo.

As duas etapas descritas foram unidas em um único documento, cuja metodologia foi dividida em duas partes, tal documento foi denominado Instrução Técnica, para ressaltar o caráter executivo prático e voltado ao mercado almejado. Contudo, as diferenças fundamentais entre planejamento e execução em campo indicam a necessidade de um material que possa transmitir informações e dados entre as equipes responsáveis por cada etapa, para atender esta necessidade, foi elaborado um Boletim de Campo.

#### **3.3.1 Instrução Técnica**

A Instrução Técnica para elaboração de pseudoseções de ERT utiliza uma estrutura conceitual baseada nas normas ABNT NBR 6484 - *Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio* e ABGE 104/2023: *Sondagem rotativa e sondagem mista*, documentos onde se evidenciam estruturas internas objetivas e claras, essas estruturas e seu conteúdo, em alguns aspectos foram adaptadas na construção da Instrução Técnica.

Para a elaboração da Instrução técnica, o principal parâmetro analisado durante a busca foi a fundamentação teórica dos trabalhos avaliados, principalmente as premissas assumidas em cada modelo estabelecido, e as correlações determinadas através da aplicação de tais premissas. Um enfoque especial foi dado

para as equações e modelos construídos que sejam dependentes de parâmetros físicos do ensaio, como o espaçamento dos eletrodos e o tipo de arranjo geométrico utilizado.

A partir dos modelos levantados, foi elaborado um sistema com base em parâmetros chave para a execução do ensaio, nesse sistema, foram incluídas hipóteses simplificadoras, cuja função é limitar a complexidade do documento e facilitar a determinação dos parâmetros de ensaio, tendo em vista que o ensaio em questão é um caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo.

### **3.3.2 Boletim de campo**

O Boletim de Campo deverá conter os parâmetros determinados com a aplicação do planejamento, e também deverá ser preenchido em parte com os valores determinados em campo. A determinação de quais valores devem ser obtidos em campo também foi feita com base na fundamentação teórica dos trabalhos analisados ao longo da pesquisa bibliográfica.

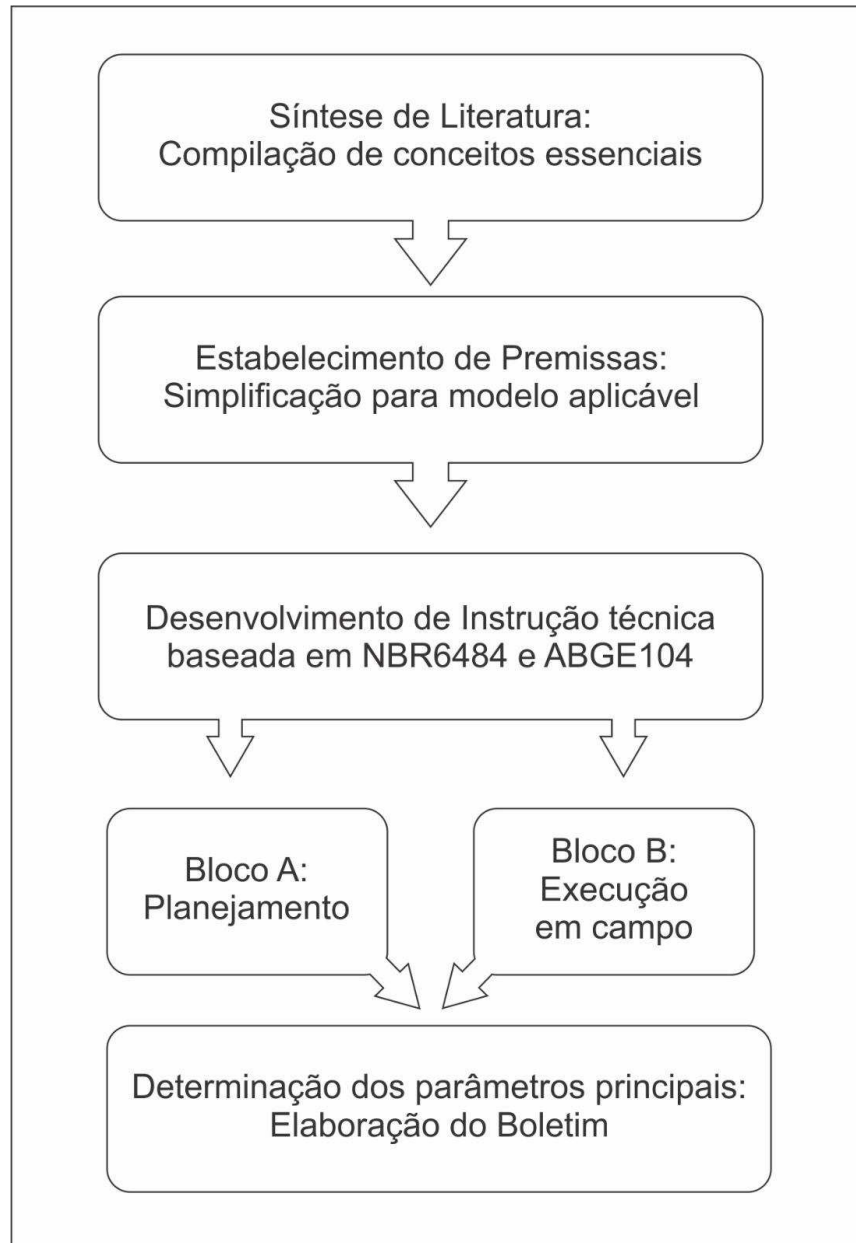
### **3.4. Esquematização da Metodologia**

Para fins de clareza expositiva, a metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em etapas distintas, organizadas de maneira segmentada a fim de facilitar a visualização e a compreensão do encadeamento lógico das atividades desenvolvidas. Contudo, destaca-se que a aplicação prática desse procedimento não se deu de forma estritamente linear.

Ao longo do desenvolvimento de determinadas etapas, foram identificados aspectos relevantes que demandaram o retorno a fases anteriores, permitindo o aperfeiçoamento contínuo do processo e a incorporação progressiva de ajustes conceituais e operacionais nas fases subsequentes.

A Figura 6 apresenta um fluxograma que sistematiza as etapas adotadas para a obtenção dos parâmetros necessários à elaboração da Instrução Técnica para execução de pseudoseções de ERT.

Figura 6 - Fluxograma da Metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4. Resultados e Discussão

Nesta seção, apresentam-se os resultados decorrentes do levantamento bibliográfico e da compilação normativa descritos na metodologia. Os produtos alcançados foram a estruturação da Instrução Técnica para execução de pseudoseções de ERT, apresentada no apêndice A, e o Boletim de Campo, disponível no apêndice B.

Serão discorridos nesta etapa, os principais conceitos levantados e o seu impacto no resultado final, incluindo as premissas adotadas para simplificar a sua operacionalização tanto no planejamento quanto na execução em campo.

Com base nas duas normas utilizadas como referência, a estrutura da Instrução Técnica foi dividida nos seguintes capítulos, que desempenham as seguintes funções:

1. Apresentação: possui papel introdutório para a natureza e origem do documento e qual a finalidade de sua criação;
2. Escopo: capítulo que detalha a aplicação das instruções apresentadas no documento, a quem elas servem e delimita a utilidade da metodologia;
3. Referências normativas: normas utilizadas ao longo do documento, que apresentam parâmetros complementares, ou representam critérios a serem atendidos;
4. Termos, símbolos e siglas: lista de significados dos termos, símbolos e siglas utilizados para simplificar conceitos ao longo do corpo da Instrução Técnica;
5. Princípios ou Fundamentos Teóricos: conjunto dos conceitos a serem compreendidos para que seja aplicada a Instrução Técnica apresentada;
6. Procedimento Executivo: etapas a serem seguidas em ordem para atingir o objetivo proposto pelo documento;
7. Apresentação dos Resultados: indica como devem ser apresentados os dados obtidos pela aplicação da do procedimento executivo;
8. Referências Bibliográficas: relação de documentos cujos conceitos foram utilizados ao longo da Instrução Técnica;
9. Apêndices: contém o Boletim de Campo como documento complementar à Instrução Técnica.

#### **4.1 Premissas adotadas**

Algumas considerações foram feitas, com o objetivo de simplificar o dimensionamento preliminar da tomografia eletrorresistiva, a seguir estão listadas as principais premissas adotadas ao longo da aplicação da metodologia proposta:

1. Os eletrodos serão dispostos sobre uma mesma linha reta, em planta;
2. O espaçamento horizontal entre eletrodos consecutivos é igual;
3. Os eletrodos são numerados em ordem crescente, no mesmo sentido do caminhamento elétrico;
4. O eletrodo B sempre deverá estar posicionado imediatamente após o eletrodo A;
5. O eletrodo N sempre deverá estar posicionado imediatamente após o eletrodo M;
6. Os eletrodos M e N não devem ser posicionados antes dos eletrodos A e B;
7. A ERT deve ser executada tendo como referência uma localização específica.

Adotar estas premissas permite que o ensaio seja classificado como um caminhamento elétrico do tipo dipolo-dipolo conforme Hallof (1957), além de simplificar numericamente os modelos adotados.

#### **4.2 Procedimento Executivo**

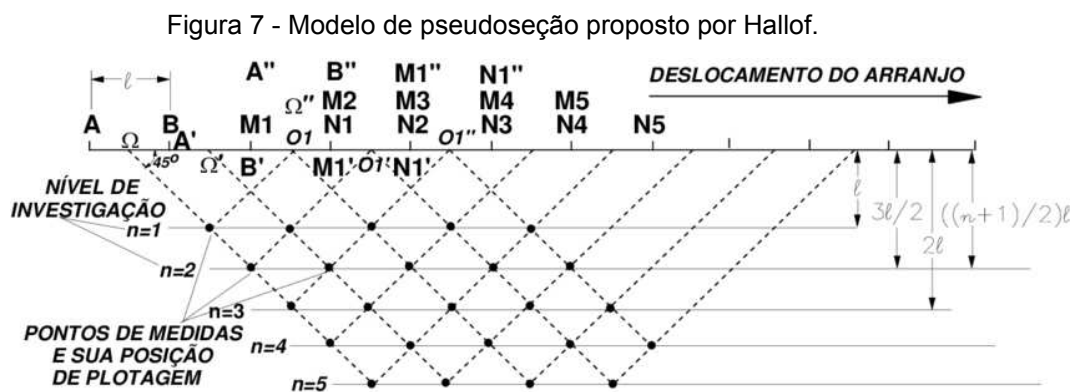
Esta seção aborda separadamente os blocos de planejamento e execução, evidenciando os resultados obtidos pela aplicação da metodologia e as considerações feitas em cada seção.

##### **4.2.1 Planejamento do ensaio**

Definiu-se com base em modelos teóricos analisados uma sequência lógica de etapas para determinar dois principais critérios da execução em campo do ensaio de obtenção da ERT, sendo eles o espaçamento e a linha de caminhamento, identificada pelas coordenadas de Início e de fim do traçado.

#### 4.2.1.1 Determinação do espaçamento dos eletrodos

Hallof (1957) propõe a metodologia de elaboração da pseudoseção do arranjo dipolo-dipolo, que consiste em traçar duas retas, partindo uma do ponto médio entre os terminais de A e B e outra do ponto médio dos terminais M e N, ambas as linhas inclinadas em 45° em direção ao subsolo. O ponto onde estas duas linhas se encontram é onde deve ser posicionada a resistividade aparente calculada. A Figura 7 ilustra o modelo descrito em detalhes.



fonte: (Gallas, 2000. Adaptado de Hallof, 1957)

Ao analisar a Figura 7, é possível observar que a diferença entre dois níveis  $n$  é igual à metade do espaçamento padronizado dos eletrodos. Na Instrução Técnica, o espaçamento é referido como  $\Delta L$ , para frisar que o espaçamento é uma parcela do comprimento total.

Por fim, a diferença de profundidade entre dois níveis consecutivos pode ser utilizada como definição para a discretização, um parâmetro a ser definido antes da determinação do espaçamento. Como a eletrorresistividade pode ser utilizada como técnica complementar, a discretização pode ser determinada com base na resolução da técnica adotada na investigação principal. Os conceitos levantados e as premissas propostas podem ser representados pela Equação 6.

$$\Delta L = 2r$$

(Eq. 06)

Na Equação 6,  $r$  representa a discretização desejada para o ensaio a ser planejado.

#### 4.2.1.2 Determinação do comprimento da linha de caminhamento elétrico

Loke (2000) apresenta os valores do Quadro 2 para a relação entre a profundidade de investigação ( $Z_e$ ) e o comprimento total da linha de caminhamento ( $L$ ), a partir do nível de investigação.

Quadro 2 - Relação entre profundidade e comprimento da linha de caminhamento.

Nível de investigação	Z/L
1	0,139
2	0,174
3	0,192
4	0,203
5	0,211
6	0,216

Fonte: (Loke, 2000, adaptado pelo autor).

Foi adotado o valor de 0,2 para a proporção entre a profundidade de investigação e o comprimento total da linha de um caminhamento executado na configuração dipolo-dipolo. A Equação 7 expressa numericamente este conceito:

$$L' = \frac{Z_e}{0,2}$$

(Eq. 07)

Onde  $L'$  representa o valor mínimo do comprimento total da linha de caminhamento, e  $Z_e$  representa a profundidade mínima desejada do ensaio.

No entanto, é necessário assegurar que haja um número inteiro de eletrodos e que, seguindo o espaçamento, todos estejam dentro da linha de caminhamento. Para isso, o valor de  $L$  adotado deve ser o menor múltiplo inteiro de  $\Delta L$  maior que  $L'$ .

#### 4.2.1.3 Determinação do número de eletrodos

Com base no que foi definido e apresentado nas seções 5.2.1.1 e 5.2.1.2, é possível concluir que o número de eletrodos pode ser definido pela Equação 8.

$$ne = \frac{L}{\Delta L} + 1$$

(Eq. 08)

Na Equação 8,  $ne$  representa o número total de eletrodos.

#### 4.2.1.4 Determinação da posição da linha de caminhamento

Denomina-se o local de referência da ERT como Ponto de Ensaio (PE). Segundo Loke (2000), a maior profundidade de investigação para um arranjo dipolo-dipolo situa-se no centro da seção; tal afirmação é corroborada pelos trabalhos de Hallof (1957) e Stummer (2003).

Uma forma de garantir a linearidade entre do caminhamento elétrico é adotar duas marcações, uma de início e uma de fim para a linha de caminhamento, referidas como PI e PF. A distância entre PI e PF deve ser igual ao L e PE deve estar situado no ponto intermediário entre ambos em planta.

A topografia e a presença de obstáculos podem impactar nos resultados (Loke, 200), portanto é necessário que PI e PF sejam escolhidos buscando reduzir o impacto destes fatores.

#### 4.2.2 Execução em campo

Erros cometidos durante a etapa planejamento do ensaio podem ser verificados e sanados sem maiores consequências, caso sejam identificados a tempo, contudo, o mesmo não se pode afirmar de erros cometidos em campo, sendo assim, o procedimento executivo de ensaio de campo foi desenvolvido observando soluções para problemas comuns, encontrados ao longo da literatura.

#### 4.2.2.1 Materiais do ensaio de campo

Quanto aos materiais necessários à investigação, a norma ASTM D6431-18: *Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation* estabelece o seguinte:

O equipamento básico utilizado para o método de resistividade de corrente contínua (CC) inclui uma fonte de energia elétrica, um dispositivo para medir a corrente, um dispositivo para medir o potencial, eletrodos e fios de conexão. As fontes de energia podem consistir em baterias de células secas, baterias recarregáveis ou geradores acionados por motor. (ASTM INTERNATIONAL, 2018, p. 3, tradução própria).

Estes equipamentos são corroborados pelas normas ABNT NBR 7117-1:2020 e ABGE 202/2023, onde também é possível identificar os valores de precisão necessários para os instrumentos de medição.

A norma ABGE 202/2023 cita que os equipamentos da Iris Instruments são alguns dos mais utilizados no mercado. A precisão de leitura de tensão e corrente dos equipamentos da Iris Instruments é de 0,01 milivolts e 0,01 miliampères (IRIS Instruments, [s.d.]).

Alguns materiais foram incluídos como a trena, para marcação da posição dos eletrodos conforme foi observada a necessidade.

#### 4.2.2.2 Preparação do solo e cravação dos eletrodos

Para viabilizar a execução, é fundamental a preparação do solo. Reynolds (2011) propôs um procedimento de preparação física do solo, incluindo a remoção da cobertura vegetal e do horizonte orgânico, seguida pela compactação, ou pisoteio, para reduzir os vazios entre grãos, estas etapas seguem a ideia de reduzir os vazios entre o eletrodo e o solo e aumentar sua condutividade.

Em solos secos, é comum que a baixa condutividade dos contatos tenha um impacto muito grande no valor da resistividade aparente medida, para melhorar este aspecto do solo, uma das precauções sugeridas é o cravamento dos eletrodos até uma profundidade de no mínimo, 5% do espaçamento entre eles (Binley & Slater, 2020).

Outra prática comum para o melhoramento do solo é aplicar soluções químicas de baixa resistividade, para preencher os vazios entre o eletrodo e o solo (Dahlin, 2001), tais soluções incluem, mas não estão limitadas a: gel condutor (Athanasίου et al., 2007), lama bentonítica (Mao et al., 2021; Binley & Slater, 2020) e, mais corriqueiramente, solução de água e sal (Dahlin, 2001).

O solo pode, ocasionalmente, apresentar uma boa condutividade em seu estado natural, neste caso, apenas a preparação física e a cravação mínima de 5% do espaçamento foram adotadas como essenciais. A aplicação de soluções químicas é recomendável apenas em situações onde procedimento padrão não é capaz de viabilizar os ensaios.

#### 4.2.2.3 Teste de contato dos eletrodos

É essencial que seja testada a resistência de contato dos eletrodos, pois valores elevados, particularmente em solos muito secos, podem resultar em problemas nas leituras. Nesses casos, torna-se necessária a utilização de soluções salinas para melhorar o contato eletrodo–solo (ASTM, 2025).

As orientações das normas consultadas não estabelecem um limite máximo prescritivo de resistência de contato para a realização adequada das leituras. Entretanto, na literatura científica são mencionados valores de referência para esse critério operacional.

Resistências de contato da ordem de 5 000  $\Omega$  são citadas como aceitáveis em levantamentos de ERT (Castelo Branco, 2013; Herring et al., 2023), enquanto valores inferiores a 1800  $\Omega$  são indicados como ideais (Vásconez-Maza et al., 2020). Recomenda-se, ainda, o tratamento de eletrodos cuja resistência de contato seja superior a duas vezes o valor observado nos eletrodos adjacentes (Herring et al., 2023).

Resistivímetros modernos permitem a leitura da corrente elétrica injetada no momento da medição, possibilitando a verificação da suficiência do sinal para a execução adequada do ensaio (ABNT, 2020b).

#### 4.2.2.4 Caminhamento Elétrico

O caminhamento elétrico é realizado deslocando progressivamente um arranjo de eletrodos ao longo de um perfil, mantendo constantes a geometria do arranjo e o espaçamento básico entre os eletrodos. Em cada posição, são efetuadas medições de corrente elétrica injetada e da diferença de potencial associada (Hallos et al., 1957).

Estas premissas podem ser atendidas mantendo os dois terminais de cada dipolo (AB e MN) conectados em dois eletrodos consecutivos, deslocando a posição do dipolo MN para pontos progressivamente mais distantes do dipolo AB, considerando o fato de que o espaçamento entre eletrodos é constante.

#### 4.2.2.5 Redução de ruído

Naturalmente o solo pode conter valores espontâneos de tensão sem a injeção do sinal, tal fator pode causar desvios nas leituras, uma das formas de evitar este tipo de problema e subtrair os valores espontâneos, medidos antes da injeção de sinal dos valores medidos após a injeção de sinal (Telford; Geldart; Sheriff, 1990). Sendo assim, a Equação 5 pode ser revisada para incluir as tensões espontâneas do solo, dando origem à Equação 9.

$$\rho = \pi n(n + 1)(n + 2)a \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{Eq. 09})$$

Na Equação 9,  $\Delta V$  representa a diferença entre a tensão induzida e a tensão espontânea em uma medição, denominadas  $V$  e  $V_0$ , respectivamente.  $V_0$  é medida sem injeção de sinal e  $V$  é medida com sinal.

A repetição de leituras é uma técnica que pode melhorar a qualidade dos dados perante situações com muito ruído (Reynolds, 2011). É comum que eletrorresistivímetros como o Syscal efetuem até mesmo 10 leituras em um mesmo ponto e que o resultado apresentado seja a média destas leituras, tal processo é conhecido como Stacking (Leontarakis; Apostolopoulos, 2013).

A execução manual de um stacking é inviável, então a quantidade de repetições foi limitada a 3, em caso de alta variabilidade entre as duas leituras iniciais, é recomendável a execução de leituras adicionais.

#### 4.2.2.6 Coleta de dados planialtimétricos

A coleta de dados altimétricos é fundamental para a redução do erro quadrático médio - RMS determinado no processo de inversão, felizmente uma medição de parâmetros altimétricos relativos é o suficiente desde que haja uma boa consistência entre os dados (White et al., 2024).

A obtenção de dados topográficos pode ser realizada de diversas formas, a seleção da abordagem mais apropriada está diretamente relacionada às características do projeto, à escala desejada e às competências técnicas dos profissionais envolvidos. Resumidamente, devem ser obtidos os valores da cota altimétrica dos pontos onde foram cravados os eletrodos individualmente.

#### 4.2.3 Tratamento preliminar dos dados

O tratamento preliminar deve consistir na elaboração da pseudoseção, etapa final do procedimento executivo e que prepara os dados para a inversão. Partindo da definição proposta por Hallof (1957) e das proposições do item 5.2.1.1, foram elaboradas as equações 10 e 11, que descrevem a posição da resistividade aparente de uma determinada medição com base na posição de seus eletrodos.

$$x = \Delta L \times \frac{M+B}{2} \tag{Eq. 10}$$

$$y = \Delta L \times \frac{M-B+1}{2} \tag{Eq. 11}$$

Onde M e B representam a numeração adotada para os eletrodos dos terminais M e B, respectivamente.

### 4.3. Boletim de Campo

Os parâmetros mais relevantes identificados através da aplicação da metodologia foram a tensão medida, a corrente injetada, o espaçamento e a quantidade de eletrodos. Para a elaborar as pseudoseções de ERT, conforme o item 5.2.3 é necessário conhecer as posições dos eletrodos usados nas medições.

Ao longo deste capítulo, foram adotadas nomenclaturas para os parâmetros de ensaio, listadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros de ensaio a constar no boletim

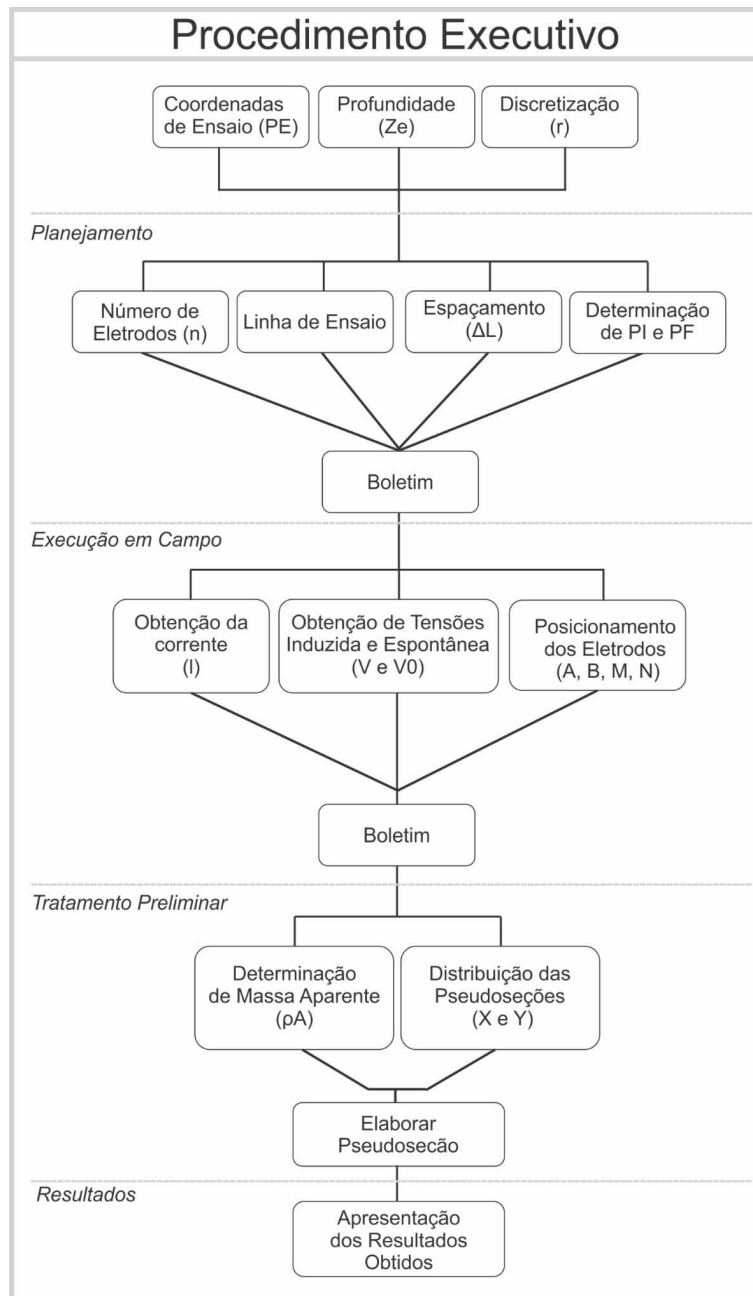
Parâmetros	Tipo	Nomenclatura
Ponto Inicial	Coordenada espacial	PI
Ponto de Ensaio	Coordenada espacial	PE
Ponto Final	Coordenada espacial	PF
Tensão Espontânea	Grandeza elétrica	$V_0$
Tensão Induzida	Grandeza elétrica	$\Delta V$
Corrente	Grandeza elétrica	I
Eletrodo A	Eletrodo de corrente	A
Eletrodo B	Eletrodo de corrente	B
Eletrodo M	Eletrodo de potencial	M
Eletrodo N	Eletrodo de potencial	N
Número de eletrodos	Parâmetro geométrico	ne
Espaçamento	Parâmetro geométrico	$\Delta L$

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.4 Esquematização do Procedimento Executivo

A Figura 8 apresenta um fluxograma que esquematiza o procedimento executivo da Instrução Técnica.

Figura 8 - Fluxograma do Procedimento executivo.

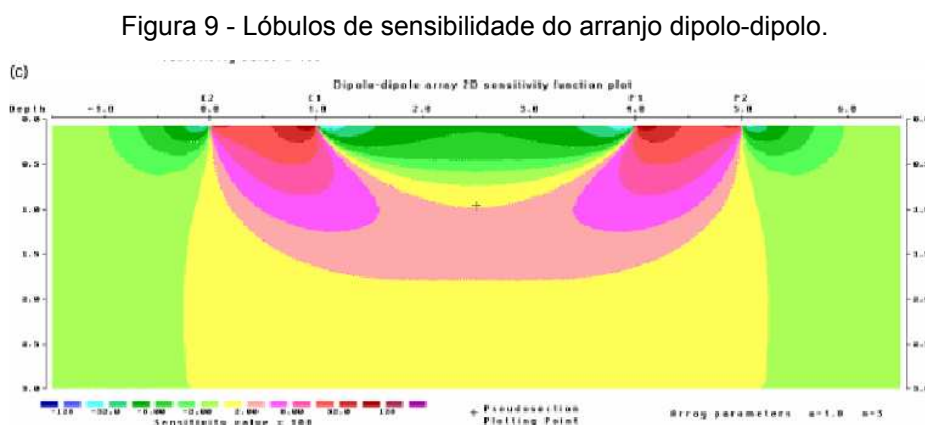


Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.5. Considerações Finais

### 4.5.1. Fundamentação das escolhas metodológicas

Loke (2000) modelou 7 tipos de arranjo para o desenvolvimento de um programa de Inversão de dados de campo, durante este processo, constatou-se que para o arranjo dipolo-dipolo os lóbulos de maior sensibilidade se localizam em duas faixas verticais compreendidas entre cada par de eletrodos, desta forma o arranjo dipolo-dipolo se torna muito sensível a variações horizontais de resistividade. A Figura 9 representa o modelo encontrado para o lóbulo de tensões do arranjo dipolo-dipolo.



Fonte (Loke, 2000)

Na Figura 9, as cores mais quentes representam uma maior sensibilidade do valor da resistividade aparente, isto é, um maior impacto da resistividade nestes pontos no valor final da resistividade aparente.

A sensibilidade horizontal do arranjo dipolo-dipolo o torna mais adequado para a identificação de singularidades, como matacões, diques e feições cársticas (Stummer, 2003).

Diante do exposto, para uma investigação geotécnica com objetivo de identificar possíveis pontos de interesse no solo com uma boa precisão visual, o arranjo dipolo-dipolo se destaca por suas propriedades físicas.

#### 4.5.2. Confiabilidade dos parâmetros selecionados

A Instrução Técnica foi elaborada com foco em investigações geofísicas rasas, com profundidade máxima de 40 metros, complementares à geotecnia, executadas com enfoque na estratigrafia, com o fim de desenvolvimento de fundações superficiais

Os parâmetros propostos para compor a Instrução Técnica e o Boletim foram selecionados em conformidade com as referências encontradas na Literatura, contudo, é necessário avaliar a sua confiabilidade perante incertezas comuns a ensaios em campo.

Um espaçamento constante, premissa escolhida para simplificar o modelo adotado é corroborado amplamente, contudo, existem algumas considerações concernentes à topografia, uma vez que um terreno muito acidentado pode dificultar a execução de um espaçamento constante em planta, como é proposto por autores como Loke (2010).

A necessidade de averiguar a presença de correntes e potenciais espontâneos no solo é evidente quando levado em consideração que estas propriedades em si são tão relevantes que constituem uma categoria própria de ensaio eletrorresistivo. Ignorar a presença de espontaneidade nas propriedades elétricas do solo pode causar distorções significativas nos resultados finais (Telford; Geldart; Sheriff, 1990).

Loke (2000) demonstra que a topografia pode reduzir o erro apresentado na inversão de resistividade, razão pela qual a coleta de dados altimétricos foi incorporada à Instrução Técnica. A variedade de métodos que podem ser aplicados nesta etapa e o fato de que a coleta topográfica foge ao escopo deste documento levaram à não inclusão de uma metodologia para a coleta destes dados, atentando-se apenas à precisão.

O Quadro 2 também demonstra que a relação  $Z_e/L$  pode variar conforme o nível da investigação, pelo método de Hallof (1957) um valor adequado para esta relação seria 0,5. Contudo, é importante frisar que a profundidade final do modelo invertido depende de uma série de fatores, especialmente da própria resistividade do solo (Loke, 2000)

## 5. Conclusão

O presente trabalho cumpriu o objetivo de propor uma sistematização para a execução de ensaios de elaboração de pseudoseção de ERT, culminando no desenvolvimento de uma Instrução Técnica e um Boletim de Campo elaborados com foco em investigações geofísicas rasas, com profundidade máxima de 40 metros, complementares à geotecnia, executadas com enfoque na estratigrafia, com o fim de desenvolvimento de fundações superficiais.

A motivação central deste trabalho reside na necessidade observada de padronizar os levantamentos geofísicos, transformando conceitos teóricos complexos em procedimentos executivos práticos e padronizados para o mercado da engenharia.

A síntese da literatura e dos materiais normativos, com ênfase na ASTM D6431-18, e nas diretrizes da ABGE, permitiu a seleção do arranjo dipolo-dipolo como base da metodologia. Conforme discutido, a sensibilidade deste arranjo a variações horizontais e a sua eficácia no imageamento de singularidades em subsuperfície justificam a sua adoção prioritária em investigações geotécnicas voltadas ao detalhamento de matacões e feições cársticas.

No que tange ao desenvolvimento dos instrumentos técnicos, o estabelecimento de premissas simplificadoras foi fundamental para reduzir a subjetividade no planejamento do ensaio. Ao limitar variáveis e simplificar equações dependentes de parâmetros físicos, a Instrução Técnica viabiliza uma determinação mais célere de espaçamentos e profundidades de investigação. Paralelamente, o Boletim de Campo integra as etapas de gabinete e campo, mitigando incertezas e garantindo a rastreabilidade dos dados coletados.

A aplicação desta Instrução Técnica deve, entretanto, considerar as limitações inerentes ao método, como a influência da topografia acidentada e os ruídos eletromagnéticos presentes em ambientes urbanos.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a validação experimental desta Instrução Técnica em diferentes contextos geológicos para mensurar o ganho de eficiência operacional. Adicionalmente, sugere-se a expansão desta metodologia para outros arranjos geométricos e a integração automatizada dos dados do Boletim de Campo em softwares de inversão geofísica.

## 6. Referências Bibliográficas

AMINZADEH, F.; DASGUPTA, S. N. *Geophysics for Petroleum Engineers*. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2013.

<sup>a</sup>ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. Norma ABGE 104/2023: sondagem rotativa e sondagem mista. 1. ed. São Paulo: ABGE, 2023.

<sup>b</sup>ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. Norma ABGE 202/2023: Investigações geofísica em terra – métodos elétricos.. 1. ed. São Paulo: ABGE, 2023.

<sup>a</sup>ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6484:2020 — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

<sup>b</sup>ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7117-1:2020 — Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos — Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geoeétrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8044:2018 — Projeto geotécnico — Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

GANDOLFO, O. C. B.; GALLAS, J. D. F. O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, n. 3, p. 281-288, 2007.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 4 v.

HALLOF P. G. 1957. On the interpretation of resistivity and induced polarization field measurements. Cambridge, MIT, Ph.D. Thesis. 216 pp.

HEMEDA, S. Electrical Resistance Tomography (ERT) Subsurface Imaging for Non-destructive Testing and Survey in Historical Buildings Preservation. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, v. 7, p. 344–357, 2013.

HERRING, T.; LEWKOWICZ, A. G.; HAUCK, C.; HILBICH, C.; MOLLARET, C.; OLDENBORGER, G. A.; UHLEMANN, S.; FARZAMIAN, M.; CALMELS, F.; SCANDROGLIO, R. Best practices for using electrical resistivity tomography to investigate permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes*, v. 34, n. 4, p. 494–512, 2023. DOI: 10.1002/ppp.2207.

IRIS INSTRUMENTS. Syscal Pro: Resistivity sounding and imaging system. Orléans, França: IRIS Instruments, [s.d.]. Disponível em: [https://www.iris-instruments.com/Pdf\\_file/Syscal\\_pro.pdf](https://www.iris-instruments.com/Pdf_file/Syscal_pro.pdf). Acesso em: 21 dez. 2025.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I.. *An Introduction to Geophysical Exploration*. 3. ed. Oxford: Blackwell Science, 2002.

KOWALCZYK, S.; ZAWRZYKRAJ, P.; MAŚLAKOWSKI, M. Application of the electrical resistivity method in assessing soil for the foundation of bridge structures: a case study from the Warsaw environs, Poland. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, v. 14, n. 2, p. 221-234, 2017.

KUMAR, N.; KUMAR, R.; CHAMISO, D. N.. Pseudo-Sections for Target Depth Estimations Using Physical Modelling Studies in Resistivity Prospecting. *International Journal of Science and Engineering Applications*, v. 12, n. 7, p. 223-227, 2023. Disponível em: <http://www.ijsea.com/archive/volume12/issue7/IJSEA12071062.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2025.

LEONTARAKIS, K.; APOSTOLOPOULOS, G. V. Model Stacking (MOST) technique applied in cross-hole ERT field data for the detection of Thessaloniki ancient walls' depth. *Journal of Applied Geophysics*, v. 93, p. 101–113, 2013. ISSN 0926-9851. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2013.04.004. Disponível em: ScienceDirect. Acesso em: 20 dez. 2025

NEUENDORF, K. K. E.; MEHL Jr., J. P.; JACKSON, J. A. (eds.). *Glossary of Geology*. 5. ed. Alexandria, VA: American Geological Institute, 2005.

CASTELO BRANCO, R. M. G.; AMORIM, A. N.; MARTINS, J. A.; LIMA JUNIOR, S. B.; PEDROSA JUNIOR, N. C.; VIEIRA, N. C. C.; OLIVEIRA, K. M. L.; CAVALCANTE, I. M. 2D/3D Electrical Resistivity Tomography (ERT) applied to preliminary economic-geo-electrical evaluation of the Jandaíra and Açú formations in the SW

border of the Potiguar Basin, Rio Grande do Norte, Brazil. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 13., 2013, Rio de Janeiro. Expanded abstracts. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2013.

REYNOLDS, J.M. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons, 2011.

RUCKER, D. F.; TSAI, C.-H.; CARROLL, K. C.; BROOKS, S.; PIERCE, E. M.; ULERY, A.; DEROLPH, C.. et al. Bedrock architecture, soil texture, and hyporheic zone characterization combining electrical resistivity and induced polarization imaging. *Journal of Applied Geophysics*, v. 188, p. 104306, 2021.

SHERIFF, R.E. *Geophysical Methods*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.

SOUSA, A.H.S. Utilização do método de eletrorresistividade (ERT) em investigações geotécnicas em um parque eólico, localizado no município de Jandaíra/RN. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

STUMMER, P.. New developments in electrical resistivity imaging. 2003. Tese de Doutorado. ETH Zurich.

TAO, Q.; ZHANG, F.; XU, X.; WANG, S.; HUANG, H. Evaluating the joint use of GPR and ERT on mapping shallow subsurface features of karst critical zone in southwest China. *Vadose Zone Journal*, v. 21, n. 6, p. e20172, 2022. DOI: 10.1002/vzj2.2017.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. *Applied Geophysics*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

TIPLER, P.A.; MOSCA, G.. *Física para cientistas e engenheiros: Mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

TOMMASI, P. *Investigações geotécnicas: ensaios de campo e métodos indiretos*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 224 p.

VÁSCONEZ-MAZA, M. D.; MARTÍNEZ-PAGÁN, P.; AKTARAKÇI, H.; GARCÍA-NIETO, M. C.; MARTÍNEZ-SEGURA, M. A. Enhancing electrical contact with a commercial polymer for electrical resistivity tomography on archaeological

sites: a case study. *Materials*, Basel, v. 13, n. 21, p. 5012, 06 nov. 2020. DOI: 10.3390/ma13215012

WHITE, A.; BOYD, J.; WILKINSON, P.; UNWIN, H.; WOOKEY, J.; KENDALL, J.; BINLEY, A.; CHAMBERS, J. Assessing the effect of offline topography on electrical resistivity measurements: insights from flood embankments. *Geophysical Journal International*, [S. l.], v. 239, n. 2, p. 1117–1132, nov. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggae313>. Acesso em: 19 dez. 2025.

## APÊNDICE A



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DAVI ALEX LIMA AZEVEDO**

**PROPOSTA DE INSTRUÇÃO TÉCNICA PARA  
ELABORAÇÃO DE PSEUDOSEÇÕES DE  
TOMOGRAFIA ELETORRESISTIVA (ERT)**

**FORTALEZA, CEARÁ 2026**

DAVI ALEX LIMA AZEVEDO

**PROPOSTA DE INSTRUÇÃO TÉCNICA PARA ELABORAÇÃO DE  
PSEUDOSEÇÕES DE TOMOGRAFIA ELETORRESISTIVA (ERT)**

Instrução Técnica elaborada como parte  
dos requisitos para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

**FORTALEZA, CEARÁ 2026**

## SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO.....	2
2. ESCOPO.....	3
3. REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....	4
4. TERMOS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	5
5. PRINCÍPIOS TEÓRICOS.....	6
6. PROCEDIMENTO EXECUTIVO.....	10
6.1. Planejamento do ensaio.....	10
6.1.1. Determinação do espaçamento dos eletrodos.....	10
6.1.2. Determinação do comprimento da linha de caminhamento elétrico.....	11
6.1.3. Determinação do número de eletrodos.....	11
6.1.4. Determinação da posição da linha de caminhamento.....	12
6.1.5. Elaboração do boletim.....	12
6.2. Execução em campo.....	13
6.2.1. Materiais.....	13
6.2.2. Demarcação da linha de ensaio.....	16
6.2.3. Sinalização de segurança.....	16
6.2.4. Preparação do terreno.....	16
6.2.5. Cravação dos eletrodos.....	16
6.2.6. Teste de contato dos eletrodos.....	17
6.2.7. Preparação e aplicação da Solução Salina.....	17
6.2.8. Leituras.....	17
6.2.9. Redução do ruído.....	18
6.2.10. Caminhamento.....	18
6.2.11. Coleta de dados planialtimétricos.....	19
6.3. Tratamento dos dados.....	20
6.4. Elaboração da Pseudoseção de ERT.....	21
7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	22
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23

## 1. APRESENTAÇÃO

Este documento apresenta uma proposta de técnica executiva para elaboração de pseudoseções de Tomografia Eletroresistiva, ou ERT (do Inglês, *Electro Resistivity Tomography*) e destina-se àqueles envolvidos em investigações geotécnicas destinadas à Engenharia Civil, particularmente no campo das investigações geofísicas.

Desenvolvida no âmbito do Trabalho de Conclusão de Curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, esta instrução técnica propõe etapas de planejamento, execução e tratamento preliminar de dados para elaboração de pseudoseções de ERT aplicando o método do caminhamento elétrico e do arranjo dipolo-dipolo, servindo de referência para futuras aplicações profissionais.

Dada a natureza da origem deste documento, os procedimentos listados baseiam-se na literatura científica e normativa disponível acerca do tema tratado, além disso, sua estrutura e apresentação se baseiam na norma *ABNT NBR 6484:2020 — Solo — Sondagens de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio*, bem como na norma *ABGE 104/2023 — Sondagem rotativa e sondagem mista*.

É recomendável que investigações executadas com base neste documento também estejam de acordo com as diretrizes e normas vigentes citadas nas referências bibliográficas, além de outros materiais complementares disponíveis em âmbito nacional e internacional, para garantir a segurança e confiabilidade dos ensaios.

## 2. ESCOPO

Esta instrução técnica tem como escopo apresentar a proposta de um método de aquisição de valores de resistividade elétrica aparente destinados à elaboração de pseudoseções de ERT, empregando o arranjo dipolo-dipolo na técnica do caminhamento elétrico.

Dispõem-se de instruções para o planejamento dos ensaios, para a execução em campo e para o tratamento preliminar dos dados obtidos, incluindo a sua apresentação na forma de uma pseudoseção de ERT.

O ensaio descrito neste documento deve ser executado por profissional legalmente habilitado, com atribuições compatíveis, cabendo ao responsável técnico avaliar a adequação dos parâmetros adotados às condições específicas do local de estudo.

O procedimento apresentado nesta instrução técnica é de caráter complementar às investigações geotécnicas, sendo necessárias investigações preliminares para determinar alguns parâmetros a serem adotados no planejamento do ensaio.

Este documento foi elaborado com foco em investigações geofísicas rasas, com profundidade máxima de 40 metros, complementares à geotecnia, executadas com enfoque na estratigrafia, com o fim de desenvolvimento de fundações superficiais.

A aplicabilidade das orientações apresentadas neste documento está limitada a presença de profissional capacitado para identificação e interpretação dos dados.

Este documento não dispõe de tratativas sobre inversão, modelagem ou interpretação geotécnica dos dados levantados.

### 3. REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Os documentos relacionados a seguir contêm disposições que, ao serem citadas neste texto, constituem requisitos desta instrução técnica. As edições indicadas estavam em vigor no momento da publicação, como todas as normas estão sujeitas a revisão, recomenda-se que se verifique a conveniência de se usar as edições mais recentes.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484:2020 — Solo — Sondagens de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7117-1:2020 — Parâmetros de solo para projetos de aterramentos elétricos — Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geolétrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. Norma 200:2023 — Geofísica aplicada: métodos e técnicas. São Paulo: ABGE, 2023.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR-10 — Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília, DF: MTE, [2019].

#### 4. TERMOS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Os seguintes termos e abreviaturas são utilizados neste documento de modo a simplificar a abordagem metodológica.

A e B – Eletrodos de injeção de corrente

ERT – Tomografia Eletrorresistiva (Electro Resistivity Tomography)

I – Corrente elétrica

L – Comprimento do ensaio

L' – Comprimento preliminar de ensaio

M e N – Eletrodos de medição de potencial

n – Número de eletrodos a serem utilizados no ensaio

PE – Ponto de referência do ensaio

PF – Ponto final do ensaio

PI – Ponto inicial de ensaio

R – Resistência elétrica

SPT – Sondagem de simples reconhecimento com SPT (Standard Penetration Test)

U – Tensão (voltagem)

UTM – sistema de georreferenciamento da Universal Transversa de Mercator

V – Tensão induzida

V0 – Tensão espontânea

$\rho$  – Resistividade elétrica

$\rho_A$  – Resistividade aparente

$\Delta L$  – Espaçamento entre eletrodos

u – Nível da investigação

$\Omega$  – Indica posição dos eletrodos de injeção no processo de caminhamento elétrico

## 5. PRINCÍPIOS TEÓRICOS

A geotecnia é a aplicação do método científico e dos princípios da engenharia para a aquisição, interpretação e uso de conhecimento de materiais da crosta terrestre para a solução de problemas de engenharia (Neuendorf et al., 2005). Por definição, a geotecnia é fundamental para diversas áreas, inclusive a engenharia civil, sendo aplicada tanto na prospecção de matérias-primas, como também no entendimento do solo como um meio cujas propriedades físicas podem ser aproveitadas.

As investigações geotécnicas consistem em explorações e análises de campo e laboratório do solo e são fundamentais para a geotecnia, sendo necessárias para a aquisição de informações que podem ser utilizadas em projetos de fundação e de obras de terra (Terzaghi et al., 1996). Uma das técnicas da investigação geotécnica que podem ser empregadas de forma complementar é a investigação geofísica.

Define-se a investigação geofísica como a prospecção de características físicas do solo para determinar as propriedades de seus componentes (Telford et al., 1990). Alguns dos métodos de investigação geofísica mais usuais são: o método magnético; a inversão polarizada; o método sísmico e os métodos eletrorresistivos (Sheriff, 1989).

O princípio dos métodos eletrorresistivos é a indução de campos elétricos no solo a partir de correntes injetadas, também referidas como sinal, estes campos elétricos induzidos terão um comportamento que pode ser usado para inferir propriedades do solo que possuam correlação com a sua resistividade elétrica.

Para conceituar a resistividade elétrica, é necessário antes apresentar a resistência elétrica. Definida pela primeira lei de Ohm, a resistência elétrica é o coeficiente de relação linear entre a diferença de potencial aplicada e a corrente elétrica criada como resposta em um condutor (Tipler; Mosca, 2009). A primeira Lei de Ohm está descrita na Equação 1.

$$R = \frac{U}{I}$$

Eq. 01

Na Equação 1 a Resistência (R), medida em ohms ( $\Omega$ ), é proporcional à Tensão (U), medida em Volts (V), e inversamente proporcional à corrente (I), que é medida em Ampéres (A).

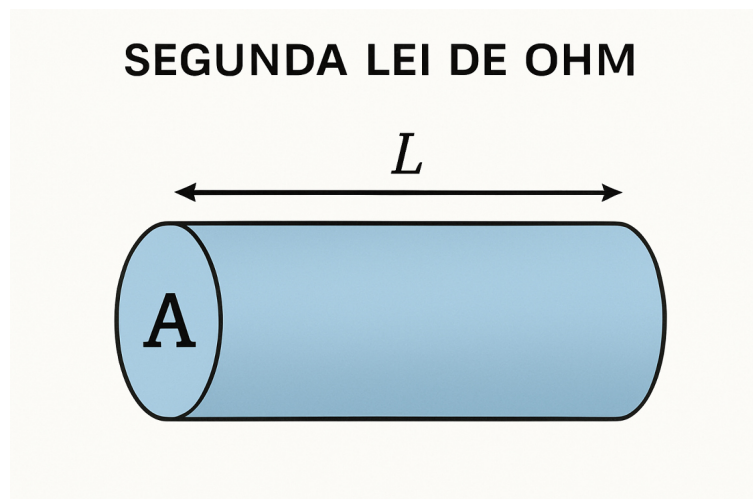
A resistência elétrica também pode ser determinada com base na geometria do condutor e na sua resistividade elétrica, neste caso, sendo definida pela segunda lei de Ohm (Halliday, 2016), conforme a Equação 2:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Eq. 02

Na Equação 2, letra grega  $\rho$  representa a resistividade, e sua unidade é ohms vezes metro, ou  $\Omega\text{m}$ . Analisando a Equação 2, é possível observar que a resistividade é definida como a resistência vezes a área da seção do condutor, A, em metros quadrados, dividida pelo seu comprimento, L, em metros. A Figura 1 representa esquematicamente a Equação 2.

Figura 1 – Esquematização da seção de um condutor



Fonte: Elaborado pelo autor.

A resistividade é uma propriedade que varia dependendo do material e das condições em que ele se encontra, o Quadro 1 apresenta os valores típicos de resistividade elétrica para alguns materiais do cotidiano (NBR 7117-1, 2020).

Quadro 1 – Relação de materiais e suas respectivas resistividades

Tipos de materiais	Faixa de resistividades ( $\Omega\text{m}$ )
Água do Mar	Menor que 10
Alagadiço, limo, húmus, lama	Até 150
Água destilada	300
Argila	300 a 5000
Calcário	500 a 5000
Areia	1000 a 8000
Granito	1500 a 10000
Basalto	A partir de 10000
Concreto	Molhado: 20 a 100 Úmido: 300 a 1000 Seco: 3000 a 2000000

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado da NBR 7117-1:2020.

Existem diferentes métodos eletrorresistivos, isto é, a resistividade elétrica do solo pode ser determinada de diferentes maneiras, desde ensaios em laboratório com amostras deformadas (Aquino, 2010), até ensaios de campo in situ, onde a resistividade elétrica pode ser determinada até mesmo de forma indireta atravessando obstáculos, como na elaboração de ERT do subsolo abaixo de um lago (SAAR et al., 2023).

Dentre os métodos eletrorresistivos, o que mais se destaca é o de quatro eletrodos, desenvolvido por Wenner (Wenner apud Telford et al., 1990). O método dos 4 eletrodos permite diferentes configurações em sua aplicação, sendo o arranjo dipolo-dipolo o mais adequado para a elaboração de perfis de tomografia devido à sua alta sensibilidade lateral (Loke, 2000).

A aplicação do arranjo dipolo-dipolo na investigação geofísica pode ser sistematizada através do caminhamento elétrico, método que consiste em leituras consecutivas de resistividade elétrica ao longo de uma linha, variando o

espaçamento dos eletrodos (ABGE, 2023). A Figura 2 esquematiza o caminhamento elétrico.

Figura 2 – Esquematização do caminhamento elétrico

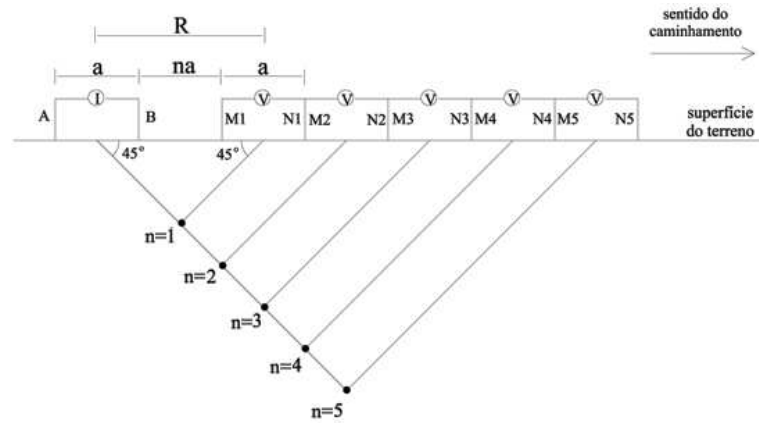


Figura 2 – Esquema de aquisição dos dados utilizando o arranjo D-D.

Fonte: (GANDOLFO; GALLAS, 2007)

## 6. PROCEDIMENTO EXECUTIVO

O procedimento executivo do ensaio de elaboração de pseudoseção de ERT está organizado em dois blocos, o primeiro destinado ao planejamento do ensaio e o segundo à sua execução em campo.

### 6.1. Planejamento do ensaio

O planejamento é o processo aplicado para determinar a quantidade eletrodos a serem utilizados em um ensaio, o espaçamento e as posições de início e fim da linha de caminhamento elétrico, com base na localização do ponto a ser investigado, na profundidade e na discretização desejadas.

#### 6.1.1. Determinação do espaçamento dos eletrodos

Para determinar o espaçamento dos eletrodos é necessário ter ciência da discretização desejada para o ensaio, sendo esta definida como a distância entre dois níveis consecutivos de investigação. A discretização adotada deve ser compatível com a resolução do método de investigação para o qual a pseudoseção de ERT servirá como complemento e com a estratificação esperada para o solo.

A diferença entre dois níveis consecutivos  $n$  e  $n+1$  é igual à metade do espaçamento entre os eletrodos, se este for constante (Loke, 2000). Com base nisso é possível estabelecer a Equação 3, que correlaciona discretização e espaçamento.

$$\Delta L = 2r$$

Eq. 03

Onde  $\Delta L$  representa o espaçamento dos eletrodos e  $r$  representa a discretização desejada, ambos em metros, recomenda-se a adoção de um valor inteiro para  $\Delta L$ , para facilitar a execução em campo do ensaio.

### 6.1.2. Determinação do comprimento da linha de caminhamento elétrico

O ensaio deve ser executado ao longo de uma linha com comprimento suficiente para garantir que sejam atingidas leituras nas profundidades desejadas. Loke (2000) propõe o valor aproximado de 0,2 para a correlação entre a profundidade de investigação e o comprimento total da seção tomográfica para um caminhamento elétrico executado na configuração dipolo-dipolo. A Equação 4 expressa numericamente este conceito:

$$L' = \frac{Z_e}{0,2}$$

Eq. 04

Na Equação 4,  $Z_e$  representa a profundidade mínima desejada de investigação, e  $L'$ , o comprimento preliminar mínimo da linha de caminhamento. O valor de  $Z_e$  deve ser compatível com os requisitos da investigação geotécnica e geofísica, sendo limitado à disponibilidade de dados para os quais a pseudoseção de ERT servirá como complemento.

O valor do comprimento adotado ( $L$ ), deve então ser corrigido para o menor múltiplo inteiro de  $\Delta L$  maior que o valor de  $L'$ .

### 6.1.3 Determinação do número de eletrodos

Os eletrodos são posicionados regularmente, com espaçamento igual a  $\Delta L$ , ao longo de uma linha cujo comprimento total é igual a  $L$ , desta forma o número de eletrodos pode ser calculado conforme a Equação 5.

$$n = \frac{L}{\Delta L} + 1$$

Eq. 05

Onde  $n$  representa o número total de eletrodos.

#### **6.1.4. Determinação da posição da linha de caminhamento**

A posição da linha de caminhamento é determinada pela marcação de dois pontos georreferenciados, nomeadamente ponto inicial (PI) e ponto final PF, a distância entre ambos deve ser igual a L, e no ponto médio entre eles se localiza o ponto de ensaio, denominado PE. A posição do ponto PE deve ser estabelecida previamente, com base nas informações fornecidas e em ensaios executados previamente.

A localização dos pontos PI e PF pode ser escolhida com base na locação do ponto PE, pois as distâncias de PI a PE e de PE a PF devem ser iguais, para fixar o centro da seção no local de PE. A determinação da localização de PI e PF em relação a PE deve ser preferencialmente feita utilizando o sistema de coordenadas da Universal Transversa de Mercator (UTM), pois este sistema utiliza valores expressos em metros, o que pode facilitar a execução em campo.

#### **6.1.5. Elaboração do boletim**

No Boletim de Campo, disponibilizado no Apêndice devem ser especificados os parâmetros determinados no planejamento do ensaio, conforme a nomenclatura adotada. O boletim deve ser entregue aos responsáveis pela execução em campo do ensaio, juntamente às orientações descritas no item 6.2.

## **6.2 Execução em campo**

Consiste na aplicação dos parâmetros de ensaio determinados no item 6.1, bem como práticas descritas na literatura para levantar os dados necessários para a elaboração da pseudoseção de ERT.

### **6.2.1 Materiais**

Os materiais necessários para a execução em campo são os seguintes:

1. Enxada, chibanca e facão, entre outros equipamentos de limpeza do terreno;
2. Estacas para marcação de pontos de referência
3. Trena de comprimento compatível com o planejado para o ensaio;
4. Eletrodos em quantidade compatível com o planejado para o ensaio;
5. Fonte de sinal;
6. Amperímetro;
7. Voltímetro;
8. Cabos de conexão;
9. Sal e água, para preparação de solução eletrolítica, se necessário.

A boa execução da metodologia de ensaio requer que os materiais descritos atendam a alguns critérios que serão apresentados a seguir.

#### **6.2.1.a Eletrodos**

Consistem em peças de formato esbelto e alongado, com ponta perfurante e seção circular, devem ter comprimento compatível com as especificações do ensaio.

Devem ser constituídos de material com boa condutividade elétrica, e boa resistência mecânica e química, para evitar o desgaste decorrente do seu uso, geralmente são adotados materiais como aço, alumínio ou outras ligas metálicas.

A Figura 3 apresenta um exemplo de eletrodo utilizado nos ensaios de levantamento de dados para elaboração de uma pseudoseção de ERT.

Figura 3 – Eletrodo



fonte: Elaborado pelo autor

#### **6.2.1.b Fonte de Sinal**

Para a medição de potenciais elétricos induzidos, deverá ser injetada uma corrente elétrica, com propriedades consoantes ao item B.2 da norma ABNT NBR 7117-1:2020. Podem ser desenvolvidos circuitos apropriados para atender aos parâmetros necessários, ou utilizados equipamentos automáticos disponíveis no mercado, como exemplificado na Figura 4.

Figura 4 – Eletrorresistivímetro automático



Fonte: elaborado pelo autor.

### 6.2.1.c Amperímetro e Voltímetro

O amperímetro e o voltímetro são equipamentos que medem, respectivamente, a corrente e a tensão, podem ser adotados dois multímetros, desde que ambos possuam a amplitude de leitura e precisão requeridas para o ensaio.

O amperímetro deve ser capaz de ler 1000mA, com precisão de pelo menos 0.01mA, e o voltímetro deve ser capaz de medir 1000mV, com precisão de pelo menos 0.01V.

A utilização de eletrorresistivímetros automáticos pode dispensar a utilização destes equipamentos, caso o circuito interno do equipamento possua instrumentos de leitura embutidos.

### **6.2.2. Demarcação da linha de ensaio**

Com base nos dados de georreferenciamento, devem ser localizados os pontos PI e PF, que devem então ser marcados com as estacas. A trena deve ser estendida entre as duas estacas, é importante evitar torções ou esticamento que possam resultar em erros na leitura.

### **6.2.3. Sinalização de segurança**

Devem ser adotadas todas as medidas de segurança previstas nas normas ABNT NBR 7117-1:2020 e na NR-10, além disso, deve ser feito um isolamento do trânsito de máquinas ao longo de toda a extensão do ensaio, para evitar danos aos cabos ou aos eletrodos.

### **6.2.4. Preparação do terreno**

Deve ser feito o expurgo da matéria orgânica e de solos superficiais soltos, que possam inviabilizar a fixação dos eletrodos e causar anomalias nas leituras. O solo natural deve ficar exposto e limpo. Materiais sintéticos como pavimentos, concreto e fragmentos metálicos devem ser removidos do solo antes da cravação dos eletrodos.

### **6.2.5. Cravação dos eletrodos**

Ao longo da linha de caminhamento, usando a trena estendida entre os pontos PI e PF, os eletrodos devem ser cravados em posições que obedeçam ao espaçamento determinado.

As estacas devem ser removidas nos pontos PI e PF e devem ser substituídas por eletrodos. Para o eletrodo cravado em PI, deve ser adotada a numeração 1, os demais eletrodos devem ser numerados em ordem crescente até a posição PF.

A profundidade de cravação dos eletrodos deve ser de pelo menos 5% do valor de  $\Delta L$ . No ato da cravação deve-se atentar a falhas no contato, isto é, verificar se o eletrodo está firme no solo, caso não esteja, o solo pode ser compactado para garantir uma melhor fixação.

### **6.2.6. Teste de contato dos eletrodos**

Deve ser efetuado o teste de contato dos eletrodos após a cravação no solo, valores de resistência de contato muito altos, ou em casos em que um eletrodo possua resistência de contato superior a duas vezes a de eletrodos adjacentes devem ser tratados conforme o item 6.2.7.

### **6.2.7. Preparação e aplicação da Solução Salina**

Para tratar a alta resistência de contato de um eletrodo, deve ser preparada uma solução eletrolítica, consistindo em partes iguais de água e sal de cozinha, em quantidades suficientes para atender a todos os eletrodos que apresentam alta resistência de contato.

A aplicação é feita diretamente no solo no ponto de cravação do eletrodo, é necessário que a solução percole na interface entre o solo e o eletrodo para que seja obtida a redução da resistência de contato.

### **6.2.8. Leituras**

Na execução das leituras, os eletrodos podem desempenhar o papel de medição, sendo estes designados M e N, ou de injeção de sinal, nomeados A e B, a medição é feita pelos eletrodos conectados ao voltímetro, enquanto a injeção de sinal é feita pelos eletrodos conectados ao amperímetro em série com a fonte.

As leituras devem ser executadas primeiramente nos eletrodos de medição M e N sem a injeção do sinal, para captar a tensão espontânea, que corresponde no boletim à coluna  $V_0$ .

Após a coleta da tensão espontânea, deve ser injetado o sinal e uma nova leitura de tensão deve ser feita, o valor medido deve ser registrado na coluna V, do boletim. Também é necessário fazer medições da corrente, com o amperímetro em série com a fonte de sinal, o valor da corrente deve ser registrado na coluna I, do boletim.

As leituras devem ser registradas em miliampère (mA) e milivolts (mV), com precisão de duas casas após a vírgula. Junto às medidas de tensão espontânea, tensão induzida, e corrente, devem ser anotadas as numerações dos eletrodos.

Na coluna A deve ser registrado o eletrodo conectado ao polo positivo da fonte de sinal, na coluna B, o eletrodo conectado ao polo negativo, já as colunas M e N são destinadas a registrar as numerações do eletrodo conectado ao contato positivo e negativo do multímetro respectivamente.

#### **6.2.9. Redução do ruído**

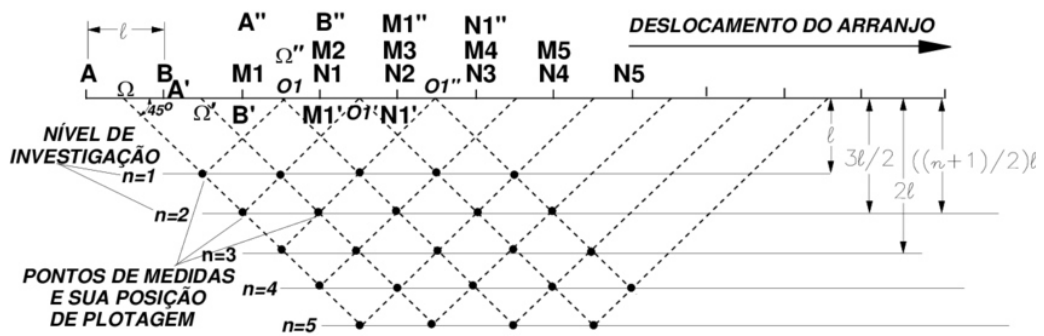
As leituras individuais sempre devem ser executadas três vezes. No caso de variações excessivas, é recomendável executar mais de três leituras, a depender do tipo de solo, além de verificar fontes de erro, das quais destacam-se erros de operação, mau contato e ruídos artificiais ou naturais.

#### **6.2.10. Caminhamento**

O caminhamento elétrico é executado movendo o dipolo MN de seus eletrodos atuais para o eletrodo subsequente, isto é, se o contato positivo do Voltímetro está conectado ao eletrodo  $n$ , e seu contato negativo está conectado ao eletrodo  $n+1$ , então o contato positivo da próxima leitura deverá ir para o eletrodo  $n+1$  e o contato negativo para o eletrodo  $n+2$ .

Este procedimento deve seguir até o papel do eletrodo N coincidir com a posição PF, em seguida, o dipolo AB deve seguir o mesmo procedimento, isto é, se o contato positivo da fonte do sinal está conectado ao eletrodo  $n$ , e seu contato negativo está conectado ao eletrodo  $n+1$ , então o contato positivo da próxima leitura deverá ir para o eletrodo  $n+1$  e o contato negativo para o eletrodo  $n+2$ . A Figura 5 esquematiza o processo.

Figura 5 – Esquematização do processo de obtenção de uma pseudoseção



Fonte: (Gallas, 2000, adaptado de Hallof, 1957)

Na Figura 5, A e B representam eletrodos de Injeção, enquanto M e N representam eletrodos de medição de tensão, é possível identificar que as posições de M e N mudam para diferentes medições. A letra grega  $\Omega$  indica a posição dos eletrodos A e B, que também evoluem conforme o caminhamento, após todos os eletrodos subsequentes a eles já terem sido usados como eletrodos de medição.

Na etapa  $\Omega'$ , os eletrodos A' e B' mudam para 1 posição acima das suas posições em  $\Omega$ , e novas medições são feitas nos eletrodos subsequentes a A' e B', até que toda a linha de caminhamento tenha sido percorrida até o último eletrodo.

### 6.2.11. Coleta de dados planialtimétricos

Os dados planialtimétricos devem ser registrados para cada ponto de inserção de eletrodo no solo junto à sua numeração, no Boletim de Campo. Os dados devem ter precisão mínima de 1 cm.

### 6.3. Tratamento dos dados

A pseudoseção apresenta dados de resistividade aparente, que são calculados a partir dos valores de tensão e sinal medidos em campo (Stummer, 2003). A correlação entre os dados de campo e a resistividade aparente é descrita na Equação 6.

$$\rho_A = \frac{(V - V_0)}{I} \pi u(u+1)(u+2) \Delta L$$

Eq. 06

Na Equação 6,  $\rho_A$  representa a resistividade aparente ( $\Omega m$ ),  $V$  é a tensão induzida (V),  $V_0$  é a tensão espontânea (V) e  $u$  representa o nível investigado, que é igual à diferença entre as numerações dos eletrodos B e M de cada leitura realizada, por último,  $\Delta L$  representa o espaçamento entre os eletrodos em metros. A resistividade aparente deve ser calculada para cada leitura executada,

A resistividade elétrica aparente média de cada ponto deve ser calculada, com base na média das resistividades aparentes das 3 ou mais leituras executadas em cada ponto, a fim de minimizar os efeitos de ruído do ambiente.

#### 6.4. Elaboração da Pseudoseção de ERT

Para a identificação da posição de um ponto na pseudoseção de ERT, utiliza-se um sistema de coordenadas cartesianas, onde x representa o eixo horizontal, paralelo à linha de caminhamento, e y representa a profundidade da leitura realizada, ambas os valores em metros. As coordenadas x e y são dadas pela Equação 7 e pela Equação 8, respectivamente.

$$x = \Delta L \times \left( \frac{B+M}{2} \right)$$

Eq 07

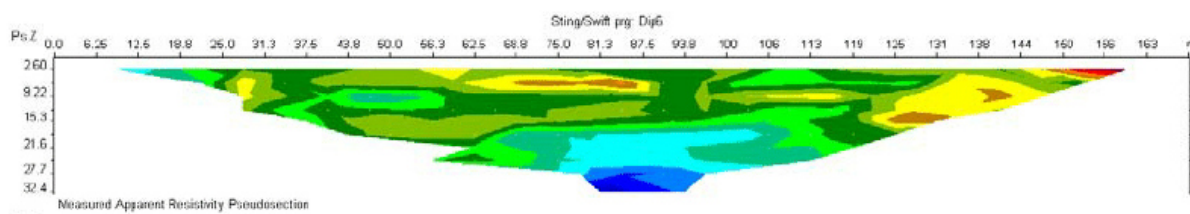
$$y = \Delta L \times \frac{M-B+1}{2}$$

Eq 08

Na Equação 7 e na Equação 8, B e M representam a numeração dos eletrodos utilizados como B e M em uma leitura, respectivamente. Os valores de x e y de cada leitura devem ser calculados.

Com base nos valores de resistividade aparente média determinados no item 6.2 e nas coordenadas x e y de cada ponto, deve ser elaborado um gráfico do tipo mapa de calor, para representar a pseudoseção. A Figura 6 exemplifica uma pseudoseção elaborada de maneira similar.

Figura 6 – Exemplo de pseudoseção de ERT.



Fonte: (Hameda, 2013)

## **7. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS**

Os resultados do ensaio de campo devem ser apresentados na forma de uma tabela, contendo todas as informações determinadas no planejamento e também os dados tratados. Juntamente aos dados tratados deve ser apresentada a pseudoseção conforme o item 6.3 deste documento.

Devem ser apresentadas as informações planialtimétricas dos pontos de cravação dos eletrodos, associando-as à sua numeração, em tabela complementar aos dados tratados.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL (ABGE). Norma 200:2023: Geofísica aplicada: métodos e técnicas. São Paulo: ABGE, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6484:2020: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7117-1:2020: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos – Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geoeletrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília, DF: MTE, [2019].
- GANDOLFO, O. C. B.; GALLAS, J. D. F. O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade. Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, n. 3, p. 227–235, 2007. DOI: 10.1590/S0102-261X2007000300001.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 4 v.
- HEMEDA, S. Electrical Resistance Tomography (ERT) Subsurface Imaging for Non-destructive Testing and Survey in Historical Buildings Preservation. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, v. 7, p. 344–357, 2013.
- LOKE, M. H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Penang: Universiti Sains Malaysia, 2000.
- NEUENDORF, K. K. E.; MEHL JR., J. P.; JACKSON, J. A. (ed.). Glossary of Geology. 5. ed. Alexandria, VA: American Geological Institute, 2005.
- SAAR, H. F. et al. Electrical Resistivity (ERI and VES), Inductive Electromagnetic in Frequency Domain (FDEM) and Time Domain IP (TDIP) geophysical methods applied to groundwater exploration in fractured basalts for sustainable agriculture. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 18., 2023, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf), 2023.
- SHERIFF, R. E. Geophysical Methods. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.
- SOUSA, A. H. S. Utilização do método de eletrorresistividade (ERT) em investigações geotécnicas em um parque eólico, localizado no município de Jandaíra/RN. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Jandaíra/RN, 2022.

STUMMER, P. New developments in electrical resistivity imaging. 2003. Tese (Doutorado) – ETH Zurich, Zurich, 2003.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. Applied Geophysics. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. 3. ed. New York: Wiley, 1996.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. Física para cientistas e engenheiros: Mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

## **APÊNDICE B - BOLETIM DE CAMPO**

## BOLETIM DE CAMPO

<b>n</b>		<b>PI</b>		m E		m S
<b>ΔL</b>		<b>PF</b>		m E		m S

PONTO PE			COORDENADA UTM FUSO: _____			
DATA	___ / ___ / ___		m N		m E	
A	B	M	N	V0 (mV)	V(mV)	I (mA)
				1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
				2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
				3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
A	B	M	N	V0 (mV)	V(mV)	I (mA)
				1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
				2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
				3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
A	B	M	N	V0 (mV)	V(mV)	I (mA)
				1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
				2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
				3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
A	B	M	N	V0 (mV)	V(mV)	I (mA)
				1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
				2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
				3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
A	B	M	N	V0 (mV)	V(mV)	I (mA)
				1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
				2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
				3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
A	B	M	N	V0 (mV)	V(mV)	I (mA)
				1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
				2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
				3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
A	B	M	N	V0 (mV)	V(mV)	I (mA)
				1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
				2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
				3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
A	B	M	N	V0 (mV)	V(mV)	I (mA)
				1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>
				2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
				3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>