



Centro Universitário de Brasília – UniCEUB  
Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas –  
FATECS

**WELTON SILVA DE OLIVEIRA**

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAR UM SISTEMA DE ATERRAMENTO  
ELÉTRICO UM ESTUDO DE CASO**

**BRASÍLIA – DF**

**2018**

**WELTON SILVA DE OLIVEIRA**

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAR UM SISTEMA DE ATERRAMENTO  
ELÉTRICO UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca examinadora do curso de Engenharia Elétrica da FATECS – Faculdade De Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – Centro Universitário de Brasília como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Luciano Henrique Duque, Me.

**BRASÍLIA – DF**

**2018**

**WELTON SILVA DE OLIVEIRA**

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAR UM SISTEMA DE ATERRAMENTO  
ELÉTRICO UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca examinadora do curso de Engenharia Elétrica da FATECS – Faculdade De Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – Centro Universitário de Brasília como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

**BRASÍLIA, 25 DE JUNHO DE 2018**

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>o</sup> Luciano Henrique Duque, Me.  
Orientador

---

Prof<sup>a</sup> Cleids Maria Lisbôa Cardoso Soares, Me.  
Convidada 1

---

Prof<sup>o</sup> William Roberto Malvezzi, Me.  
Convidado 2

## RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso se propõe a dimensionar um sistema de aterramento elétrico de um estudo de caso, que será capaz de reduzir a resistência do solo, de modo que garanta a boa condução das correntes elétricas indesejáveis para a terra, salvaguardando os equipamentos, as instalações elétricas e os recursos humanos. O planejamento do sistema se dará por meio da aplicação de métodos que possibilitam a medição da resistência do solo, a sua estratificação e o dimensionamento de uma malha de aterramento. Para isso, será necessário o uso de um terrômetro digital para realizar as medições da resistência do solo, e o emprego de um *software* específico para simular a estratificação e a malha de aterramento dimensionada. Os resultados obtidos pela simulação no *software*, serão utilizados para fins comparativos com os resultados encontrados pela metodologia aplicada neste projeto, objetivando a retificação do dimensionamento do sistema de aterramento do estudo de caso.

**Palavras-chave:** Estratificação do Solo. Resistência do Solo. Malha de Aterramento. Aterramento Elétrico.

## **ABSTRACT**

The present course competition assignment proposes to scale an electrical grounding system a case study, that will be able to reduce the soil resistance, so that confirm the good conduct of unwanted electrical currents to the Earth, safeguarding the equipment, the electrical installations and human resources. The planning of the system will occur through of application of methods what enable the measurement of soil resistance, its stratification and sizing a grounding mesh. This will require the use of a ground tester to carry out the measurements of soil resistance, and the application of a specific software to simulate the stratification and the grounding mesh scaled. The results obtained by simulation in software, will be used for comparative purposes with the results found by the methodology applied in this project, aiming the rectification of dimensioning of the grounding system of the case study.

**Keywords:** Soil Stratification. Soil Resistance. Grounding Mesh. Grounding System.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Resistividade do sistema de aterramento .....	2
1.2 Medições da resistência do solo.....	4
1.3 Objetivo Geral.....	5
1.1.1 <i>Objetivo Específico</i> .....	6
1.4 Motivação .....	6
1.5 Metodologia .....	7
1.6 Resultados Esperados .....	9
1.7 Trabalhos Correlatos.....	10
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
2.1 Conceitos básicos de aterramentos .....	11
2.2 Segurança e sistemas de aterramento.....	14
2.3 Resistividade do Solo.....	20
2.4 Medição da resistividade do solo.....	25
2.4.1 <i>Método de medição por amostragem</i> .....	25
2.4.2 <i>Método de medição local</i> .....	27
2.4.2.1 <i>Método de Frank Wenner</i> .....	27
2.4.2.2 <i>Método de Schlumberger</i> .....	32
2.5 Estratificação do solo.....	35
2.6 Cálculo da Resistência de Terra.....	45
2.7 Técnicas típicas para melhorar a resistência de aterramento .....	51
2.8 Resistência aparente de aterramento para hastes .....	52
2.9 Redução das Camadas .....	53
2.10 Coeficiente de Penetração.....	54
2.11 Coeficiente de Divergência.....	55
2.12 Resistividade Aparente (Duas camadas).....	55
2.13 Dimensionamento da Malha de Aterramento .....	57
2.14 Resistência de Aterramento da Malha .....	58
<b>3. DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>59</b>
3.1 Estudo de Caso.....	59
3.2 Medição da Resistência do Solo .....	60
3.2.1 <i>Terrômetro digital MEGABRAZ</i> .....	61
3.2.2 <i>Direções a serem medidas</i> .....	62
3.2.3 <i>Definição do espaçamento entre os eletrodos e profundidade</i> .....	63
3.2.4 <i>Resultados de medição</i> .....	63
3.3 Cálculo da Resistividade do Solo .....	65

3.4	Estratificação do solo.....	67
3.5	Cálculo da Resistividade Equivalente ( $\rho_{eq}$ ) .....	82
3.6	Cálculos dos Coeficientes de Penetração ( $\alpha$ ) e Divergência ( $\beta$ ).....	82
3.7	Obtenção da Resistividade Aparente ( $\rho_a$ ).....	83
3.8	Definição do Tipo do Solo.....	85
3.9	Dimensionamento Inicial da Malha.....	85
3.10	Profundidade da Malha ( $h$ ).....	86
3.11	Resistência de Aterramento ( $R_{malha}$ ).....	86
3.12	Dimensionamento da Malha 2 e sua Resistência.....	87
3.13	Dimensionamento da Malha 3 e sua Resistência.....	88
3.14	Simulação via Software .....	89
<b>4.</b>	<b>TESTES E RESULTADOS ALCANÇADOS .....</b>	<b>95</b>
4.1	Cálculo da Resistividade.....	95
4.2	Avaliação das Medições .....	95
4.3	Estratificação .....	97
4.4	Da Análise da Resistividade Aparente.....	99
4.5	Dimensionamento da Malha .....	100
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>104</b>
5.1	Conclusões .....	104
5.2	Propostas de Trabalhos Futuros .....	105
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>106</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em instalações elétricas de um modo geral, há uma crescente solicitude em manter continuidade do fornecimento de energia elétrica, tal como em garantir a segurança na utilização de equipamentos que necessitam da rede elétrica para funcionar. Esta segurança está relacionada com a proteção do patrimônio imóvel e móvel, diante de possíveis incêndios provocados por curto-circuitos, a proteção dos recursos humanos perante efeitos danosos de um choque elétrico, bem como a proteção dos próprios equipamentos conectados à rede.

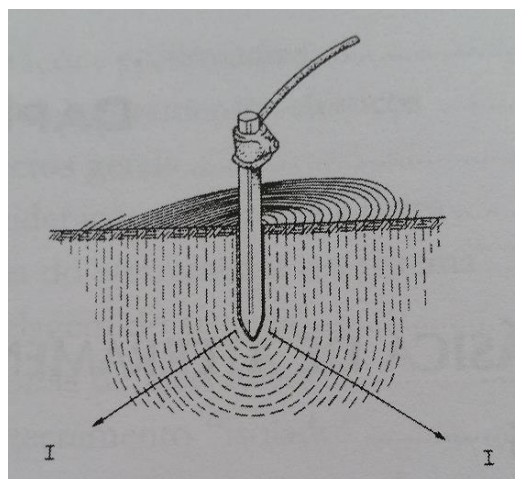
No intuito de alcançar um maior índice de segurança nas instalações elétricas, também a redução dos períodos de faltas de fornecimento de energia, é de suma importância a construção de um aterramento elétrico, sistema eficaz que auxilia na proteção contra sobretensões ou correntes de fuga. Sobre o tema Kindermann e Campagnolo (1995) enfatiza que:

Para que um Sistema de Energia Elétrica opere corretamente, com uma adequada continuidade de serviço, com um desempenho seguro do sistema de proteção e, mais ainda, para garantir os limites (dos níveis) de segurança pessoal, é fundamental que o quesito Aterramento mereça um cuidado especial. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

Por este motivo, é indispensável a construção de um aterramento elétrico nas instalações elétricas.

O aterramento elétrico “ consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo”. (VISACRO, FILHO, 2016)

**Figura 1.1** – Constituição de Um Aterramento



Fonte: (VISACRO, FILHO, 2016).



A Figura 1.1 mostra a constituição básica de um sistema de aterramento, onde há uma conexão elétrica que liga pontos do sistema a um eletrodo de aterramento, criando a conexão física pela qual as correntes indesejáveis ao sistema serão eliminadas. Esta conexão deve proporcionar um caminho com a menor resistividade possível, de modo que as correntes possam se dispersar no solo. Tal resistividade é chamada de resistividade do sistema de aterramento ou resistência de terra.

### 1.1 Resistividade do sistema de aterramento

Visacro, Filho (2016), explica que a resistividade do sistema de aterramento elétrico pode ser composta por 3 (três) resistências, são elas:

- Resistência própria do eletrodo e das ligações elétricas ao mesmo (usualmente de valor muito reduzido dada a alta condutividade dos metais empregado);
- Resistência de contato entre o eletrodo e a terra adjacente ao mesmo (de valor desprezível se o eletrodo estiver isento de qualquer cobertura isolante, como tintas, óleos e gorduras, e se a terra estiver bem comprimida de encontro à superfície do eletrodo);
- Resistência da terra circunvizinha (componente fundamental, que efetivamente determina o valor da resistência de um aterramento bem instalado, e que depende basicamente da resistividade do solo e da distribuição da corrente provinda do eletrodo, está determinada principalmente pela forma e dimensão do mesmo).

Como já citado no terceiro tópico, a resistência da terra circunvizinha é a componente fundamental que contribui para o valor da resistência do sistema, foco principal deste trabalho. Tal resistência está diretamente ligada as características do solo que “para o projeto de um sistema de aterramento, é de primordial importância o conhecimento prévio”, (MAMEDE, FILHO, 2010), são elas: o tipo do solo; sua umidade; concentração e tipos de sais dissolvidos na água; sua compacidade; granulometria temperatura e; estrutura geológica.

Todas essas características devem ser levadas em consideração na fase inicial do planejamento do aterramento, haja vista que existem solos que inviabilizam a aplicação do sistema, que é o caso de solos de natureza basalto, que podem alcançar valores de até 20.000  $\Omega.m$  de resistividade, haja vista que “um solo bom condutor é aquele cuja resistividade elétrica varia entre 50 e 100  $\Omega.m$ ”, (CRUZ e ANICETO, 2012). O Quadro 1.1 mostra os valores usuais de resistividade de determinado tipos de solo.

**Quadro 1.1** – Faixa de Valores de Resistividade de Determinados Tipos de Solo

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Resistividade (<math>\Omega.m</math>)</b>
Lama	5 a 100
Húmus	10 a 150
Limo	20 a 100
Argilas	80 a 330
Terra de jardim	140 a 480
Calcário fissurado	500 a 1.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000
Areia comum	3.000 a 8.000
Basalto	10.000 a 20.000

Fonte: (VISACRO, FILHO, 2016).

Além das características naturais do solo, a distribuição da corrente proveniente do eletrodo possui sua influência no valor final da resistência de aterramento. Essa distribuição depende da forma, dimensão, profundidade e ligações dos eletrodos. Conhecido como geometria ou configuração de aterramento, pode assumir várias formas, a depender do solo em que será empregado e o objetivo do projeto. Um bom exemplo de geometria bastante utilizada em projetos de Sistema Contra Descargas Atmosféricas (SPDA) é a configuração de 3 (três) hastes verticais interligadas, dispostas no vértice de um triângulo equilátero, conforme Figura 1.2.

**Figura 1.2** – Exemplo de Geometria de Aterramento



Fonte: (Um aterramento com hastes, 2013).

Para a definição desta configuração, é necessário realizar análises das características do solo e empregar expressões matemáticas para verificar a eficácia da geometria de aterramento no solo específico. Essa análise fará parte do escopo deste trabalho, onde será definida a melhor geometria a ser empregada no estudo de caso, isto inclui o estudo da estratificação do solo, na qual consistem em separar o solo em várias camadas de diferentes resistividades, ao passo em que se aumenta a profundidade.

## 1.2 Medições da resistência do solo

No que toca as medições da resistência do solo, neste projeto será empregado o método de Frank Wenner, onde consiste na medição utilizando quatro eletrodos enterrados no solo: duas hastes serão utilizadas para aplicar uma corrente elétrica no solo e as outras duas captam a queda de tensão ocasionada pela corrente para obter o valor de resistência.

O aparelho que realiza essa tarefa de injetar a corrente elétrica no solo, fazer a leitura da queda de potencial e calcular a resistência no solo, é o Terrômetro. Ilustrado na Figura 1.3, será o instrumento de medição empregado neste trabalho de conclusão de curso.

**Figura 1.3 – Terrômetro Digital MEGABRAS**



Fonte: (Arrendamiento de equipos de medición para obras de electrificación).

Como outro recurso utilizado neste relatório, além do emprego do terrômetro, será utilizado para dimensionamento do sistema de aterramento elétrico, *software* específico para tal, neste caso o TecAT Plus. Onde o mesmo é capaz de realizar a estratificação do solo e dimensionar a geometria do aterramento. Informações essenciais para construção do aterramento elétrico, como ilustra a Figura 1.4.

**Figura 1.4 – Construção de um Aterramento Elétrico**



Fonte: (Portifólio, 2015).

### 1.3 Objetivo Geral

Este projeto tem como finalidade a redução da resistência de um determinado solo por intermédio do dimensionamento de um aterramento elétrico, a fim de garantir a dispersão de correntes indesejáveis por meio da terra.

### 1.1.1 Objetivo Específico

Os objetivos específicos a serem alcançados com a realização deste trabalho são:

- ✓ Localizar um terreno adequado para o estudo de caso;
- ✓ Compreender e utilizar um terrômetro;
- ✓ Obter dados coerentes da resistividade do solo na medição;
- ✓ Modelar o solo por meio da estratificação;
- ✓ Definir a resistividade aparente do solo;
- ✓ Identificar o tipo de solo do estudo de caso;
- ✓ Dimensionar o sistema de aterramento;
- ✓ Obter valores da ordem de 10 (dez) ohms para a resistência do sistema de aterramento;
- ✓ Simular a estratificação do solo, dimensionamento e resistência do sistema de aterramento através do *software* TecAt Plus 6.3;
- ✓ Fazer comparativo entre os valores calculados manualmente com os resultados do *software*.

## 1.4 Motivação

A motivação deste trabalho de conclusão de curso está alicerçada nas constantes necessidades de construção de sistemas elétricos mais seguros, tanto para os equipamentos elétricos quanto para seus usuários.

Segundo a Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidades, 2018, foram mais de 627 acidentes de origem elétrica no ano de 2017, no Brasil. Acidentes estes, que por vezes, são causados por falta de aterramento elétrica nas instalações.

Este projeto motiva-se também, devido ao que estabelece a atual legislação brasileira, principalmente no que concerne a Lei nº 11.337 de 26 de julho de 2006, que dispõe acerca da obrigatoriedade dos sistemas de aterramentos em instalações elétricas.

## 1.5 Metodologia

Para o método de pesquisa para este projeto foi adotado o qualitativo através da pesquisa de campo. Sua esquematização para seu desenvolvimento foi realizada da seguinte forma:

A primeira fase do projeto estabelece a realização de **estudos** no que concerne o aterramento elétrico, entendendo os fatores que influenciam na resistência do solo e as fórmulas apresentadas na atual literatura acerca do assunto;

A segunda fase dispõe sobre o **reconhecimento do terreno** a ser estudado, verificando a ocorrência de obstáculos que impeçam a realização de medições, cravamento de hastes de cobre ou a instalação de malhas de aterramento, se for o caso;

A terceira etapa compreende no estudo específico acerca das **técnicas das medições** de aterramento elétrico, isso inclui desde as teorias de medições, como a de Frank Wenner até a aplicação prática da medição por meio de instrumentação;

A quarta fase marca o início das **medições**. Serão realizadas as cravações dos eletrodos em vários pontos estratégicos do solo e, posteriormente, a conexão dos bornes do terrômetro aos eletrodos. Isso permitirá que o instrumento faça a medição da resistência do solo, por meio do método de Frank Wenner;

A quinta etapa consiste em **registrar** todos os **dados** obtidos na medição com o instrumento, como os valores de resistência, espaçamento entre os eletrodos e eixos de medição.

Diante dos resultados das medições, serão calculados os valores das resistividades do solo, e realizar a verificação quanto a coerência dos valores medidos. Essas ações contemplam a sexta etapa da metodologia;

Já na sétima fase, será realizada a modelagem do solo, dividindo-o em pelo menos três camadas, afim de alcançar valores próximos a realidade do estudo de caso;

O oitavo momento marca a definição do valor da resistividade aparente, que se dará por meio da utilização das referências bibliográficas;

O nono passo será a definição do **tipo de solo** que se enquadra o estudo

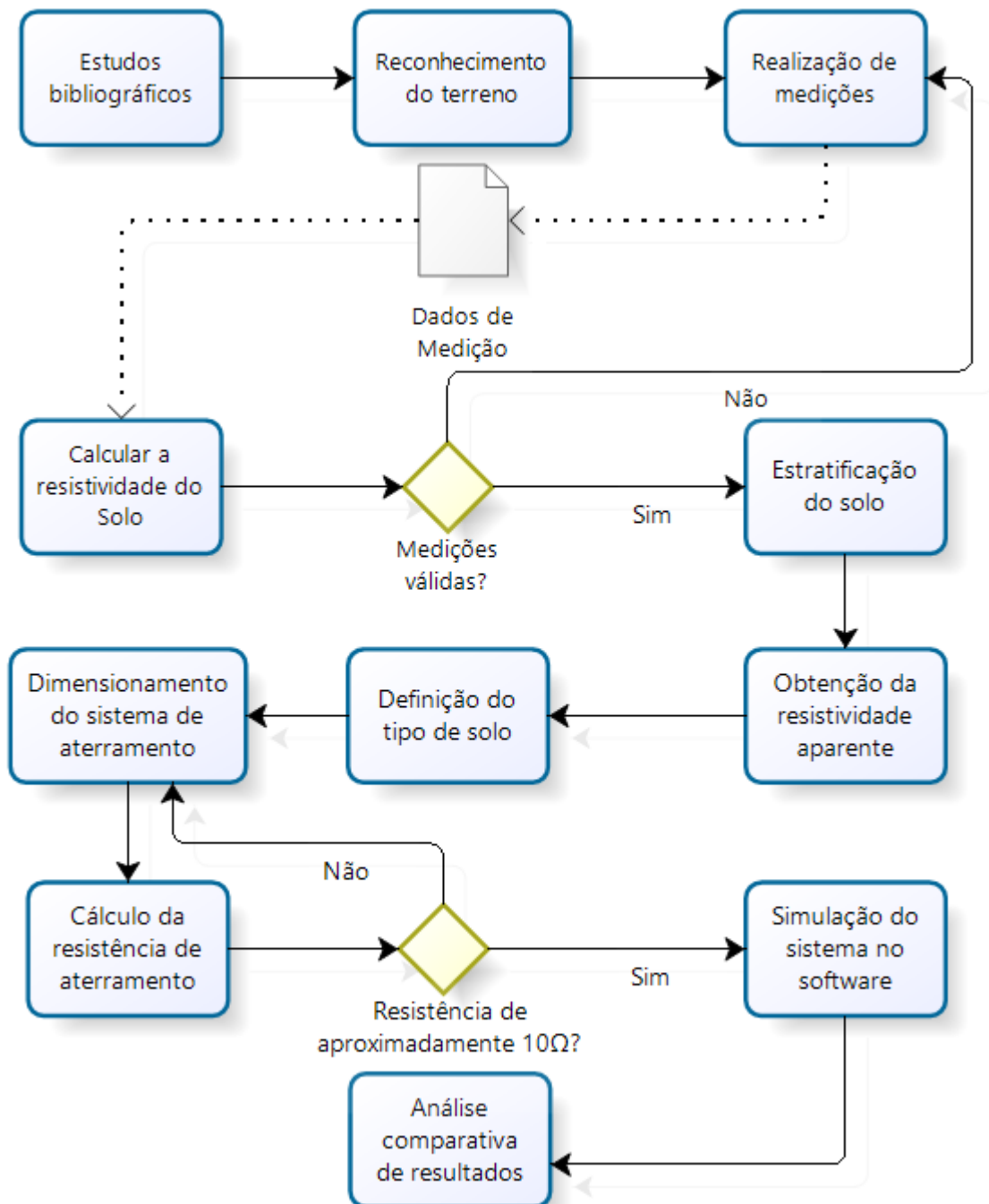
de caso, por meio de uma comparação entre a resistividade do solo e os parâmetros bibliográficos que definem o seu tipo;

Com o valor da resistividade aparente, será feito o dimensionamento do sistema de aterramento, tomando como critério, a redução do valor da resistência de aterramento até a ordem dos 10 (dez) ohms. Esta será a décima etapa;

Já na décima primeira fase, será realizada a simulação da estratificação e do sistema de aterramento no *software* TecAt Plus 6.3. Tal fase se dará por meio da inserção dos valores de medição obtidos pelo terrômetro;

Como último passo, será realizada a comparação entre os **resultados** teóricos obtidos ao longo deste trabalho com os valores simulados o *software* TecAT Plus 6.3.

Figura 1.5 – Diagrama da Metodologia do Trabalho



Fonte: autoria própria.

## 1.6 Resultados Esperados

É aspirado que, com o dimensionamento do aterramento elétrico do estudo de caso, tanto manualmente quanto pelo método computacional, seja alcançado o valor da ordem de 10 (dez) ohms para a resistência de aterramento e que, haja a existência de similaridade entre os resultados calculados e os obtidos por meio da



simulação no *software*.

Vale ressaltar que, apesar da Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004, estabelecer que a resistência de aterramento deve ser a menor possível, foi necessário definir um critério para que pudesse ser feita uma avaliação do aterramento projetado. Pensando nisso, foi optado por utilizar como valor de projeto,  $10 \Omega$ , que é a resistência de aterramento mais aceita atualmente no mercado.

### 1.7 Trabalhos Correlatos

Tiago Figueira Leão Pinheiro (2013) escreveu um relatório acerca das diferentes técnicas de como fazer um sistema de aterramento de acordo com o local a ser construído, abordando os fatores que circundam o tema.

Lívia Maria de Resende Raggi (2009) desenvolveu uma dissertação de mestrado apresentando uma abordagem objetiva de projetos de malha de aterramento, considerando atividades e procedimentos relacionados.

Fernando Moreira Viana (2016) elaborou uma dissertação de mestrado que propõe uma metodologia para interpretação de medições de resistividade do solo obtidas utilizando quatro eletrodos de Wenner, Shlumberger e Shlumberger-Palmer.

Neste caso, este trabalho tem por propósito o planejamento de um aterramento elétrico de um local específico, considerando todos os fatores que envolvem o tema, como medições, configuração dos eletrodos, estratificação do solo e redução da resistência de aterramento.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

No Capítulo 2 será tratado todo o assunto pertinente ao tema desde projeto, como conceitos básicos de aterramento, resistividade do solo, métodos de medição, estratificação do solo e dentre outros.

Afim de dinamizar o capítulo, os temas foram separados por tópicos, conforme segue:

### 2.1 Conceitos básicos de aterramentos

O aterramento elétrico é a ligação proposital da rede elétrica ao solo por meio de eletrodo (s), cujo objetivo fundamental é proporcionar maior segurança, tanto para os equipamentos elétricos quanto para seus usuários. Segundo o que diz o autor Filho em seu livro o aterramento elétrico é constituído por três componentes:

- a ligação elétrica do sistema aos eletrodos;
- eletrodo (s) de aterramento; e
- o solo que envolve os eletrodo (s).

O eletrodo a que o autor se refere, nada mais é que qualquer tipo de corpo metálico colocado no solo capaz de conduzir corrente elétrica.

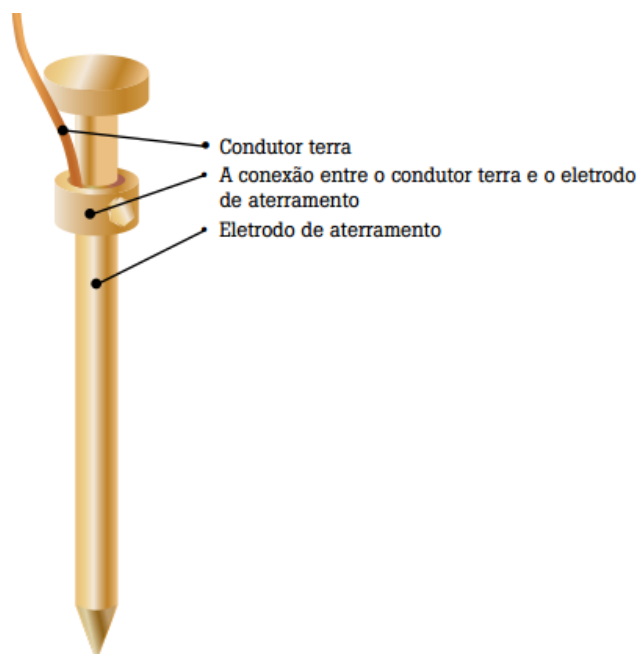
O ponto do sistema que se deseja conectar ao solo pode ser de natureza variada. Dependendo da aplicação, este pode constituir-se em uma trilha numa paca de circuito impresso, na carcaça de um motor ou de um computador ou, ainda, no neutro de um sistema elétrico. (VISACRO, FILHO, 2016)

Também os eletrodos de aterramento podem ter configuração muito diversificada. Basicamente, o eletrodo se constitui em qualquer corpo metálico enterrado no solo. Podem ser enumeradas algumas configurações usuais, como cantoneiras de ferro galvanizado, sistemas hidráulicos ou malhas em reticulado. A forma, como a disposição geométrica dos eletrodos no solo são as mais variadas, de acordo com a aplicação. Destacam-se as hastes verticais, usadas principalmente quando as camadas mais fundas do solo têm menor resistividade, e que são muito práticas, por serem de fácil cravação. Os eletrodos horizontais, enterrados usualmente a profundidades da ordem de 0.5 metro, são usados principalmente quando a maior preocupação é o controle do gradiente de potencial da superfície do solo. (VISACRO,

FILHO, 2016)

A figura 2.1 mostra um eletrodo e sua conexão à rede elétrica.

**Figura 2.1** – Eletrodo de Aterramento Conectado à Rede

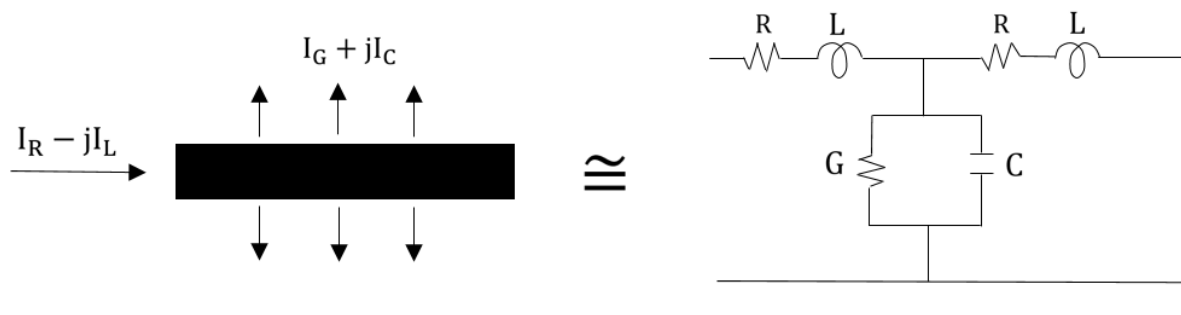


Fonte: (JÚNIOR, 2013).

Afim de averiguar o funcionamento dos aterramentos, de um modo geral, devemos considerar que na conexão com o solo deva apresentar capacitância, indutância e resistência, no qual cada um influencia na capacidade da corrente elétrica chegar até a terra. Ou seja, o sistema elétrico vê o aterramento como uma impedância.

No intuito de demonstrar a impedância do sistema de terra, a figura 2.2 mostra, de forma simplificada, um aterramento por meio de um circuito equivalente.

**Figura 2.2** – Componentes de Corrente no Solo



Fonte: (VISACRO, FILHO, 2016).

Se uma porção limitada do eletrodo é considerada, pode-se notar que a corrente dissipada para o solo é composta pelas quatro componentes representadas na figura. A corrente que é injetada no eletrodo é parcialmente dissipada para o solo e parcialmente transferida para o comprimento restante do eletrodo. No que concerne a essa última parcela, a corrente longitudinal, são observadas perdas internas ao condutor e um campo magnético é estabelecido na região em volta dos caminhos de corrente (no interior e exterior do condutor). Em termos de um circuito equivalente, o cômputo das energias correspondentes pode ser feito por meio de uma resistência em série. (VISACRO, FILHO, 2016)

Em muitas aplicações, não se refere à impedância de aterramento, mas à sua resistência. Isto se deve ao fato de que, nas condições dessas aplicações, os efeitos reativos são muito reduzidos. Essas condições são usuais para fenômenos lentos, cujas frequências representativas têm valor reduzido. A configuração resultante para o circuito equivalente se aproxima de um conjunto de condutâncias colocadas em paralelo. Esse é o caso de ocorrências próximas às condições de regime em sistemas de potência, como curto-circuitos. (VISACRO, FILHO, 2016)

Para determinar a resistência de aterramento, usa-se a Lei de Ohm para fazer a relação entre a queda de tensão adquirida pelo aterramento com a corrente injetada na terra, ficando:

$$R_T = V/I \quad (2.1)$$

Onde:

$R_T$  – resistência de aterramento ( $\Omega$ );

$V$  – tensão (V);

$I$  – corrente injetada (A).

O termo normalizado para designar a resistência oferecida à passagem de uma corrente elétrica para o solo através de um aterramento é “Resistência de Aterramento”. Contudo, a designação “Resistência de Terra” ganhou força entre os técnicos, sendo hoje a mais empregada. Para se estabelecer uma ideia da ordem de grandeza desse valor, deve-se considerar inicialmente que a terra não é um bom condutor de eletricidade, isto é, possui alta resistividade. Contudo, a seção reta do caminho percorrido por uma corrente no solo pode ser bastante ampla, de forma que,

a despejo da alta resistividade do solo, sua resistência real pode ser bem pequena. (VISACRO, FILHO, 2016)

A presença do aterramento se manifesta, na perspectiva do sistema, quando flui corrente pelos seus eletrodos. Na ausência da mesma tem-se um potencial nulo nos eletrodos (mesmo potencial de um ponto infinitamente afastado). A resistência de aterramento pode afetar o sistema de duas formas. Primeiramente, através de uma influência ativa, o seu valor pode ser determinante na limitação do valor de corrente que flui para o solo. Por outro lado, numa perspectiva passiva, deve-se considerar que o fluxo de corrente pelo aterramento resulta e uma elevação de potencial no solo, transmitida ao ponto de aterramento do sistema, e que o valor dessa elevação de potencial  $V_T$  é diretamente proporcional ao valor da resistência de aterramento. (VISACRO, FILHO, 2016)

$$V_T = R_T \cdot I \quad (2.2)$$

## 2.2 Segurança e sistemas de aterramento

Para este tópico, será dado uma breve introdução de alguns conceitos fundamentais na segurança, tanto de pessoal quanto de equipamentos, afim de realçar as relevância e restrições dos sistemas ne aterramento nas instalações elétricas. Tendo em vista que o quesito segurança possui um elevado grau de preocupação em qualquer projeto.

O emprego de sistemas de aterramento está alicerçado em três fatores principais, que é: o bom desempenho do sistema conectado à terra; a segurança dos seres vivos; e a proteção dos equipamentos conectados à rede elétrica.

No primeiro caso se situam as questões associadas à forma pela qual o comportamento do aterramento afeta o desempenho do sistema. No que concerne à implementação do aterramento, os aspectos de segurança podem ser enfocados segundo duas perspectivas. (VISACRO, FILHO, 2016)

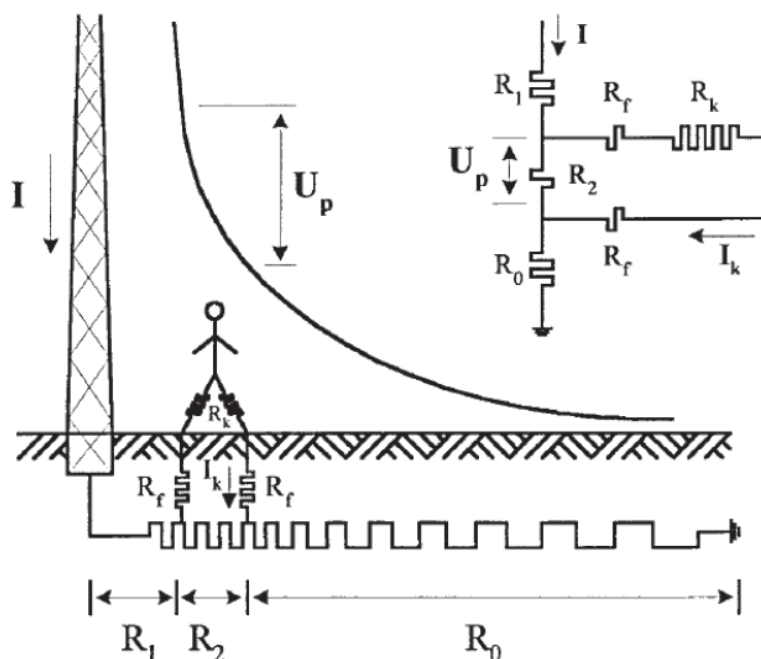
Na primeira perspectiva, a motivação básica para implementação do aterramento é a questão da segurança. Tal é o caso das conexões à terra do sistema de proteção contra descargas atmosféricas e das carcaças de motores que são projetadas especificamente para constituir um fator de segurança. (VISACRO, FILHO, 2016)

Outra perspectiva refere-se aos riscos associados à implantação de um aterramento destinado especificamente a assegurar um bom desempenho para determinado sistema elétrico ou eletrônico (aterramento de serviço). Embora a segurança não seja a finalidade primeira da instalação do aterramento, também neste caso devem ser garantidas as condições de segurança, quando o aterramento é solicitado pelo fluxo de correntes pelos seus eletrodos (por exemplo, corrente de curto-circuito) e diferenças de potenciais são estabelecidas no solo. (VISACRO, FILHO, 2016)

Com relação aos outros dois fatores, segurança dos seres vivos e proteção dos equipamentos, a seguir será apresentado conceitos básicos de segurança relacionados ao tema.

Quando as partes do corpo humano são submetidas a uma diferença de potencial, o mesmo é percorrido por uma corrente elétrica, que pode resultar em diversos efeitos para o indivíduo, configurando, em diversas situações, condições de risco. No que concerne ao aterramento elétrico, é possível caracterizar algumas dessas situações típicas quando flui corrente pelo mesmo, sendo usual classificá-las e referenciá-las como parâmetros de restrição nos projetos de aterramentos: (VISACRO, FILHO, 2016)

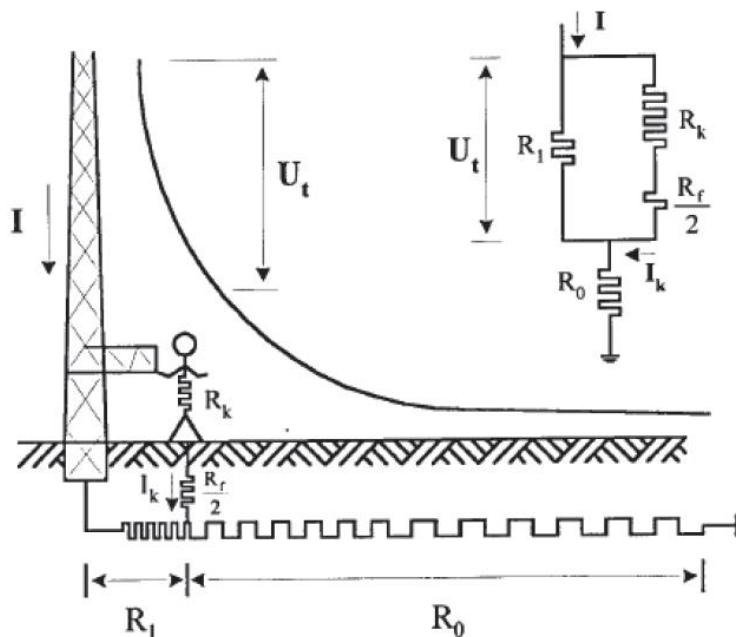
**Figura 2.3 – Tensão de Passo**



Fonte: (FLORES, 2014).

- **Tensão de passo:** Máxima diferença de potencial entre os pés (arbitra-se uma distância de 1m entre os mesmos) a que ficaria submetida uma pessoa eventualmente presente na região do aterramento, durante o fluxo de corrente pelo mesmo. (VISACRO, FILHO, 2016)

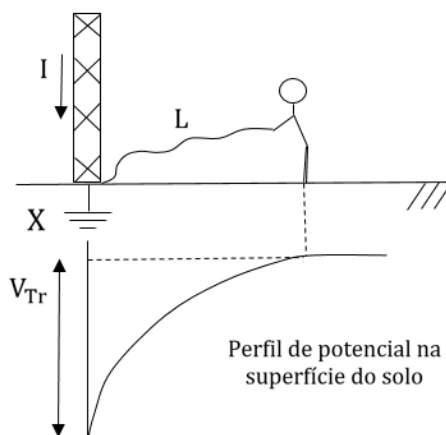
**Figura 2.4** – Tensão de Toque



Fonte: (FLORES, 2014).

- **Tensão de toque:** Máxima diferença de potencial entre mão e pés a que ficaria submetida uma pessoa, eventualmente presente na região do aterramento, que tivesse contato com uma parte metálica ligada aos seus eletrodos, durante o fluxo de corrente pelo aterramento (considera-se ambos os pés afastados de 1m da estrutura tocada). (VISACRO, FILHO, 2016)

**Figura 2.5 – Tensão Transferida**



Fonte: (VISACRO, FILHO, 2016).

- **Tensão transferida:** É a elevação de potencial total da malha referida a infinito, usualmente designada GPR (Grounding Potential Rise). Constitui-se no potencial a que ficaria submetida uma pessoa posicionada no terra remoto (grande distância da malha) que tivesse contato com uma parte metálica eventualmente conectada com os eletrodos do aterramento, durante o fluxo de corrente pelo mesmo. (VISACRO, FILHO, 2016)

Interessa assegurar que as correntes geradas no corpo humano por tais tensões não atinjam valor capazes de gerar efeitos patológicos. Normalmente é possível alcançar tais objetivos através de práticas e técnicas de projeto. Com relação à tensão transferida tais práticas impõem o seccionamento e isolamento de qualquer parte metálica não energizada conectada aos eletrodos e que ultrapasse a região do aterramento (constituindo-se, portanto, num possível agente de transferência de potencial quando flui corrente no aterramento), No que concerne às tensões de toque e passo, no projeto define-se a configuração do aterramento com determinado posicionamento dos eletrodos no solo, de forma a se assegurar que, durante o fluxo da corrente máxima pelo aterramento (determinada pela solicitação crítica da instalação, por exemplo, máxima corrente de curto), os valores máximos de tais tensões sejam inferiores àquelas que poderiam causar no corpo correntes capazes de gerar efeitos patológicos. (VISACRO, FILHO, 2016)

#### ➤ A CORRENTE ELÉTRICA NO CORPO HUMANO



A corrente elétrica no corpo humano é capaz de resultar em diversos danos, como formigamento de membros, enrijecimento muscular, alteração do ritmo cardíaco, ocorrência de queimaduras, alterações sanguíneas. Estes danos possuem quatro principais fatores responsáveis por suas causas, são eles:

**Intensidade e duração da corrente no corpo:** como é de esperar-se, quanto maior é a intensidade e duração da corrente elétrica no corpo humano, maior serão os danos causados por ela. “Assim, aquando do dimensionamento de um sistema de terra, o objetivo passa por limitar as correntes que possam circular no corpo humano pra que nunca se verifiquem estes últimos e mais graves efeitos” (FLORES, 2014).

Para se ter uma noção acerca das causas que a corrente elétrica é capaz de fazer, a medida em que se aumenta sua intensidade, *Dalziel* explica em um estudo presente em (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2000) onde conclui que:

- Uma corrente de 1mA é o limiar da percepção e traduz-se apenas numa ligeira sensação de formigueiro entre as mãos ou os dedos;
- Correntes entre 1 e 6 mA não impossibilitam uma pessoa de controlar os seus músculos e assim libertar um objeto que esteja a ser percorrido por uma corrente;
- Correntes entre 9 e 25 mA são já consideradas correntes dolorosas, que dificultam e podem até mesmo impossibilitar uma pessoa de libertar um objeto energizado. Para correntes superiores poderão resultar contrações musculares e conseqüentemente tornar a respiração difícil. Estes efeitos são, normalmente, passageiros e resolúveis;
- Correntes entre 60 mA e 100 mA são o limite para a ocorrência de fibrilação ventricular, paragem cardíaca e bloqueio das vias respiratórias e podendo resultar mesmo em morte.

**A impedância do corpo humano:** basicamente, a veemência da corrente elétrica resultante no corpo humano, durante um choque elétrico, depende da impedância que a corrente encontra ao percorrer o corpo, e a diferença de potencial aplicada a ele.

A impedância total do corpo é uma função da tensão aplicada, apresentando um valor de ordem não superior a 1 k $\Omega$  (choque entre mãos ou entre uma mão e pé, do mesmo lado) para 95% da população e diferença de potencial superior a 200 V. O valor da impedância é bem maior para tensões inferiores. (VISACRO, FILHO, 2016)

Para os casos em que as tensões são inferiores a 50 V, a impedância do corpo humano é reduzida para a ordem de 500  $\Omega$ , isto porque a pele está exercendo uma função de limitadora da corrente elétrica. No entanto, conforme esta tensão vai se elevando, a pele vai perdendo sua importância, até o ponto da ocorrência de ruptura do tecido.

O valor da impedância interna é máximo para um percurso entre mãos ou entre uma mão e um pé. É comum expressar-se como parcela desse valor máximo, a impedância entre outros percursos menos longos. Para percursos de corrente diferentes do referenciado (mão e pé esquerdos), é possível projetar-se o valor de corrente “I<sub>h</sub>” que origina o mesmo risco de fibrilação ventricular através do fator de corrente no coração “F” ( $I_h = I_{ref} / F$ ), através da tabela apresentada a seguir. Assim, uma corrente de 200 mA entre as mãos tem o mesmo efeito de 80 mA entre mão e pé esquerdos. (VISACRO, FILHO, 2016)

**Quadro 2.1** – Fator de Corrente do Coração para Diferentes Caminhos de Corrente.

<b>Caminho de corrente</b>	<b>Fator de corrente do coração</b>
Mão esquerda ao pé esquerdo	1,0
Ambas as mãos ao pé	1,0
Mão esquerda à mão direita	0,4
Mão direita ao pé esquerdo	0,8
Costas à mão direita	0,3
Costas à mão esquerda	0,7
Peio à mão direita	1,3
Peito à mão esquerda	1,5

Fonte: (VISACRO, FILHO, 2016).

**Frequência:** O ser humano é bastante vulnerável aos efeitos da corrente elétrica a frequências de 50 ou 60 Hz, sendo que uma corrente de 0,1 A pode ser fatal. Pesquisas indicam que o corpo humano consegue tolerar correntes AC com frequências na ordem dos 25 Hz e correntes DC 5 vezes superiores. Estudos de *Dalziel* revelam que para frequências entre 3000 e 10000 Hz o corpo humano pode tolerar correntes mais elevadas, como é também exemplo o caso de descargas atmosféricas. (FLORES, 2014)

**Tipo de corrente:** De uma forma geral os efeitos em corrente contínua são muito menos pronunciados que os correspondentes em corrente alternada, o que aumenta consideravelmente os limiares de corrente para os mesmos efeitos considerados e minimiza a ocorrência de acidentes graves com este tipo de corrente. Para análise de ondas de corrente de curta duração e/ou impulsivas, pode-se recorrer à integração dos produtos “ $i.t$ ” ou “ $i^2.t$ ”, para avaliar as probabilidades de risco. Evidentemente, devido à curta duração do choque, os valores permissíveis de corrente são extremamente mais elevados, em relação aos casos considerados anteriormente. (VISACRO, FILHO, 2016)

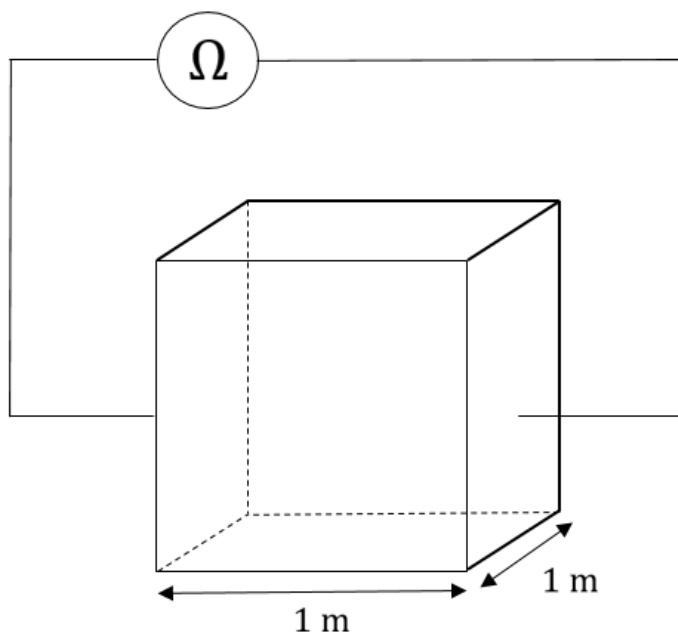
### 2.3 Resistividade do Solo

O valor da resistividade do solo é de suma importância para definirmos a configuração do sistema de aterramento, já que ele influencia diretamente no valor da resistência de aterramento.

Pode-se definir a resistividade do solo ( $\rho$ ) como a resistência elétrica (R) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (aresta  $l$  de 1 m, área das faces A de 1 m<sup>2</sup>) preenchido com este solo. Sua unidade é “ $\Omega.m$ ”. Sabe-se que: (VISACRO, FILHO, 2016)

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{ou} \quad \rho = R \frac{A}{l} \quad (2.3)$$

**Figura 2.6** – Ilustração de Um Cubo de Dimensões Unitárias



Fonte: (FLORES, 2014).

Para entender melhor a resistividade do solo ( $\rho$ ) é necessário analisar os fatores que influenciam em seu montante, são eles:

**Tipo de solo:** A definição da resistividade do solo ( $\rho$ ) por intermédio do tipo de solo em que será implementado o sistema de aterramento, é um método questionável isto porque não é possível obter um valor exato. Conforme apresentado na Figura 1.1 a resistividade do solo possui uma faixa de valores referenciais bastante extensas, que variam conforme o tipo do solo, tornando impossível a obtenção de um valor confiável. “Além disso, a experiência mostra que, usualmente, são encontrados valores diferentes de resistividade para a mesma variedade do solo de localidades distintas” (VISACRO, FILHO, 2016).

No entanto, o conhecimento dos tipos de solo para o projeto do aterramento é de grande importância, pois, sempre que possível, o projetista buscará solos com menor resistividade a fim de melhor viabilizar a estratificação do solo.

**Umidade do solo:** Para entender o efeito da umidade na resistividade do solo, deve-se considerar que, em baixa frequência, a condução no solo se faz basicamente por mecanismos eletrolíticos. Para que a eletrólise se estabeleça é essencial a existência da água e dos sais que vão prover os íons da mistura. Assim, a condutividade do solo é sensivelmente afetada pela quantidade de água nele

contida, sendo que o aumento da umidade do solo implica a diminuição da sua resistividade. Na realidade, a água é o principal elemento de condução de corrente no solo, o que pode ser comprovado, por exemplo, pelo comportamento da condutividade do solo quando lhe é alterada a concentração de sais minerais. (VISACRO, FILHO, 2016)

O volume de água que o solo poderá possuir está condicionado a diversas causas, como o clima local, a presença de lençóis freáticos, a formação do solo, sua porosidade, sua exposição as precipitações, dentre outras.

É razoável ressaltar que, um volume elevado de água presente no solo não significa que ele é um bom condutor, isto porque a condução da corrente elétrica depende da quantidade de sais contidos no solo. A água age apenas como um dissolvente para que os sais formem um meio eletrolítico promissor para a corrente elétrica.

Para fins de verificação da relação entre a umidade do solo e sua resistividade, o Quadro 2.2 apresenta a variação dos valores para um solo arenoso.

**Quadro 2.2** – Resistividade de Um Solo Arenoso com Concentração de Umidade

<b>Índice de Umidade (% por peso)</b>	<b>Resistividade (<math>\Omega.m</math>) (solo arenoso)</b>
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Conforme anteriormente exposto, é notável que à medida que a umidade do solo aumenta sua resistividade diminui, com uma variação maior entre 0% a 15% do índice de umidade.

**Sais dissolvidos na água:** Como visto no subitem 2.1.2, os sais dissolvidos na água é que são responsáveis pela eletrólise, que por sua vez favorece a passagem de corrente elétrica. Sabendo disso, podemos dizer que o tipo de sais e sua quantidade presente no solo interfere na resistividade. Como podemos observar no Quadro 2.3, que mostra a relação entre um tipo de sal adicionado na água que umedece um solo, com a resistividade do solo.

**Quadro 2.3** – Influência de Concentração de Sais na Resistividade do Solo

<b>Sal adicionado (% por peso)</b>	<b>Resistividade (<math>\Omega</math>.m) Solo arenoso</b>
0	107
0,1	18
1,0	1,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1,0

Fonte: (VISACRO, FILHO, 2016).

Aplicado à um solo arenoso, os resultados da tabela acima mostram que, quanto maior for a quantidade de sal dissolvido na água menor será a resistividade do solo. É possível notar que, de um solo que não possui sais, para outro que possui 0,1% de sal adicionado, a resistividade varia drasticamente.

**Compacidade do solo:** A compacidade do solo, ou concentração do solo, é o índice usado para mensurar o nível de compactação do material da terra. Ela interfere na resistividade visto que quanto mais compacto for o solo, maior será a continuidade física por onde percorrerá a corrente elétrica. Um solo que apresenta maior compacidade possui uma menor resistividade.

**Granulometria do solo:** Um solo é composto por vários grãos de diferentes tamanhos que mantém contato físico uns com os outros que, quanto maior for esse contato, mais favorável será para a passagem de corrente elétrica. Além disso, a capacidade de retenção de água do solo também está associada ao valor de sua resistividade.

Em ambos os aspectos, a influência de uma granulometria maior tende a aumentar a resistividade (menor capacidade de retenção de água no solo, deixando-a fluir para camadas mais profundas ou evaporar-se; menor contato entre os grãos resultando em menor continuidade elétrica). Nos dois aspectos, a presença de grãos de tamanhos variados tende a diminuir a resistividade, pois os grãos menores preenchem os vazios existentes entre os grãos maiores, provocando uma maior continuidade da massa do solo e maior capacidade de retenção da sua umidade. (VISACRO, FILHO, 2016)

**Temperatura do solo:** A temperatura em que o solo se encontra também possui sua influência no índice da resistividade, isso devido a evaporação da umidade presente na terra, ocorrida devido a temperaturas elevadas, aumentando o valor da resistividade. Já o contrário, em temperaturas baixas, a resistividade tende a ser menor, isto porque a umidade do solo tende a ser maior.

**Quadro 2.4** - Efeito da temperatura na resistividade do solo

Temperatura (°C)	Resistividade ( $\Omega.m$ ) Solo
+ 20	72
+ 10	33
0 (água)	138
0 (gelo)	300
- 5	790
- 15	3.300

Fonte: (VISACRO, FILHO, 2016).

O Quadro 2.4 apresenta o efeito que a variação da temperatura causa no valor da resistividade do solo. É possível notar que a redução da temperatura, entre 20°C à 10°C, causa uma redução de até 42% na resistividade do solo, mas para temperaturas menores que isto, causaria o efeito inverso devido ao congelamento da água.

**Estrutura geológica:** Apesar de, muitas vezes desprezado, o solo é na maioria das vezes estratificado em diversas camadas sobrepostas de diferentes resistividades. Salienta-se ainda que, devido ao facto de o solo possuir características anisotrópicas, os valores da resistividade medidos variam com a direção.

Habitualmente, é considerado o valor médio dessas mesmas medições. (FLORES, 2014)

## 2.4 Medição da resistividade do solo

A medição da resistividade do solo é realizada com o intuito de obter um conjunto de diferentes medidas da qual resultará um modelo equivalente do solo, onde será então montado o sistema elétrico de terra. (FLORES, 2014)

Basicamente, existem dois métodos de medição da resistividade do solo: medição por amostragem, onde é recolhido uma amostra do solo para testá-la em laboratórios; e a medição local, na qual consiste na utilização de equipamento que injeta corrente elétrica no solo por meio de eletrodos.

### 2.4.1 Método de medição por amostragem

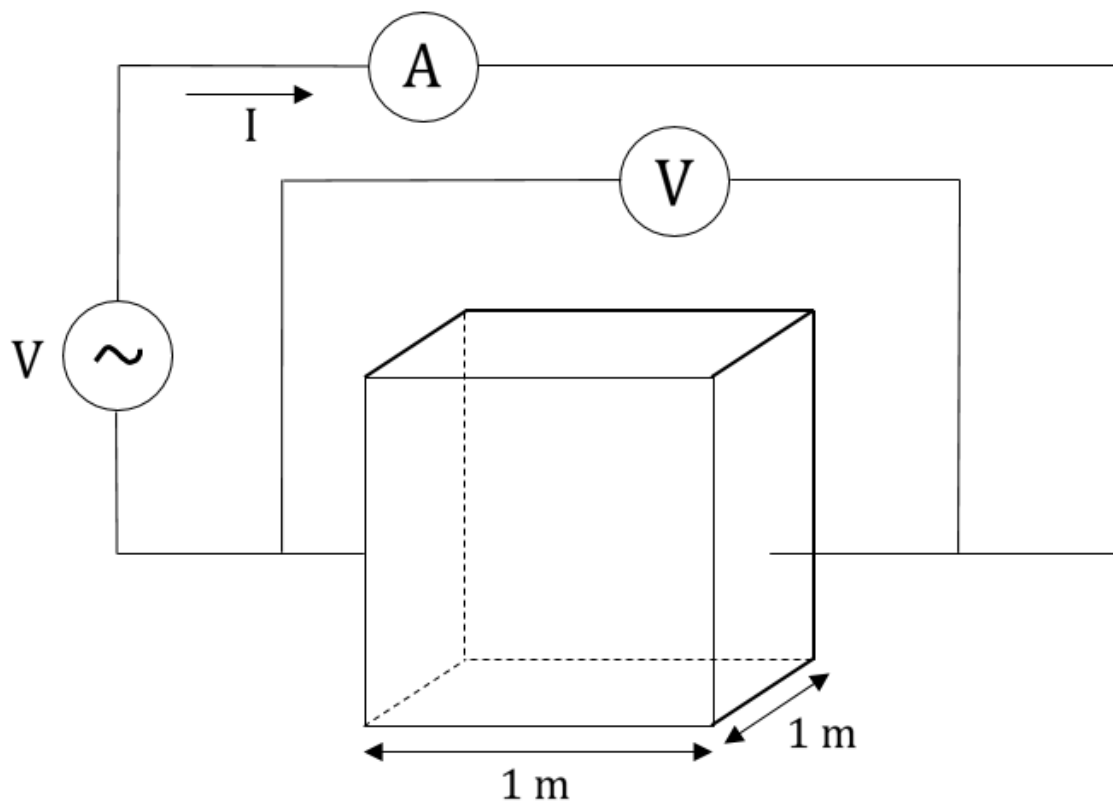
Este método de medição inicia-se através do recolhimento da amostra do solo, geralmente retirada a uma certa profundidade do solo no qual possui uma maior proteção contra as variações das condições ambientais.

O processo baseia-se na medição da resistência entre duas faces condutoras de uma cuba de dimensões conhecidas, preenchida com a amostra do solo. As paredes laterais da cuba devem ser constituídas de materiais isolantes. O solo deve estar firmemente compactado de encontro às faces dos eletrodos metálicos. Evidentemente, devem existir cuidados com relação à distribuição e fuga de corrente na cuba, associados à faixa de frequência e nível de potencial em que se processa a medição. (VISACRO, FILHO, 2016)

A Figura 2.7 mostra o princípio de funcionamento deste método de medição.



**Figura 2.7 – Medição da Resistividade do Solo por Amostragem**



Fonte: (FLORES, 2014).

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.4)$$

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (2.5)$$

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.6)$$

Onde:

$V$  – representa a queda de tensão que ocorre entre as duas faces (V);

$R$  – resistência encontrada através da relação  $V$  e  $I$  ( $\Omega$ );

$I$  – corrente elétrica injetada na amostra (A);

$A$  – área da face do cubo ( $m^2$ );

$\rho$  – resistividade do solo ( $\Omega.m$ );

$l$  – aresta da face do cubo (m);

Devido este método basear-se em medições por amostragem e considerando que a maior parte do solo estudado é heterogêneo, a medição não proporciona uma garantia de que os resultados obtidos são convenientes. No entanto, é normal a utilização “apenas como complemento às medições efetuadas no próprio local de estudo” (FLORES, 2014).

#### 2.4.2 *Método de medição local*

O método de medição local consiste em realizar várias medições na terra onde será implantando o sistema de aterramento elétrico de modo que garanta resultados mais precisos. Devido a esta precisão, a medição local é mais usual que o método de medição por amostragem, isso pelo fato de que grande parte dos solos estudos possuem características heterogênea.

Se a terra fosse um corpo de dimensões bem definidas, a medição da resistividade do solo ao local seria simples: se injetaria no solo uma corrente de valor conhecido, detectando-se a queda de tensão resistiva causada no solo pela mesma. Estabelecendo-se a relação entre tensão e corrente, obter-se-ia a resistência  $R$  do solo. Ora, conhecendo-se a resistência do solo e as suas dimensões lineares, chegar-se-ia ao valor da sua resistividade (por exemplo,  $\rho = R.A/L$  para uma configuração cilíndrica). Porém, a terra é um corpo tridimensional que não apresenta dimensões definidas para o percurso da corrente. (VISACRO, FILHO, 2016)

A despeito dessas dificuldades, Frank Wenner {10} desenvolveu um método simples de medição, no qual ele mostra que a resistividade do solo ( $\rho$ ) tem uma relação proporcional com o valor de resistência  $R$  medida no solo, através de uma constante geométrica determinada a partir da configuração de eletrodos de medição utilizada na implementação do método. (VISACRO, FILHO, 2016)

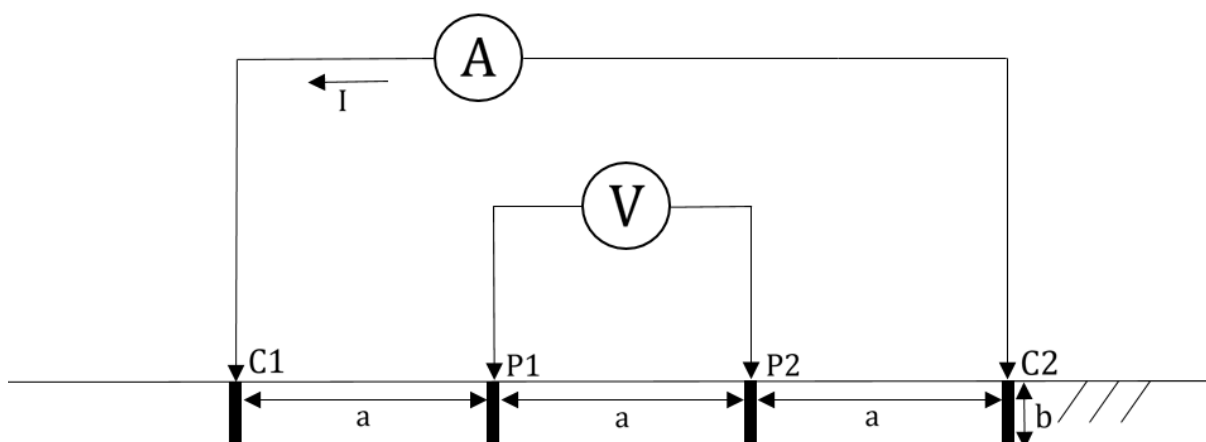
##### 2.4.2.1 *Método de Frank Wenner*

Para implementação do método, devem ser cravadas no solo quatro hastes cilíndricas igualmente espaçadas e dispostas em linha. O diâmetro das hastes não deve exceder a um décimo do espaçamento e a profundidade atingida pelas hastes deve ser a mesma. (VISACRO, FILHO, 2016)

A figura 2.8 ilustra esta configuração, onde o “b” representa a profundidade

atingida pelas hastes e “a” significa o espaçamento entre elas.

**Figura 2.8** – Configuração para Medição Através do Método de Wenner



Fonte: (FLORES, 2014).

Utilizando os terminais C1 e C2, injeta-se um determinado valor de corrente no solo para ocasionar uma queda de tensão que será identificado pelos terminais P1 e P2. De posse desses dados, é possível encontrar a resistência do solo entre as hastes P1 e P2, utilizando a Lei de Ohm.

Esta resistência encontrada “depende fundamentalmente da distância entre os eletrodos e da resistividade do solo, sendo que a dimensão dos eletrodos não tem grande influência” (FLORES, 2014).

Frank Wenner também conseguiu mostrar que é possível estabelecer uma relação linear entre a resistência mensurada e a resistividade do solo, conforme mostra a equação (2.7).

$$\rho = K R \quad (2.7)$$

Onde:

$\rho$  – resistividade do solo ( $\Omega.m$ );

$R$  – resistência medida ( $\Omega$ );

$K$  – constante que depende da geometria empregada nas medições.

A fórmula para encontrar o valor da constante de  $K$  para esta configuração geométrica, se dá por:

$$K = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (2.8)$$

Onde:

$a$  – espaçamento entre os eletrodos (m);

$b$  – profundidade dos eletrodos (m).

Em análise a equação (2.8) é possível notar que, em situações práticas, o denominador poderá assumir valores entre 1 e 2, visto que ele depende do espaçamento entre as hastes e sua profundidade na terra. Acerca desta observação, podemos simplificar a equação, assim como Filho escreve em seu livro:

- Se  $b$  é muito grande comparado com  $a$ , o denominador se aproxima da unidade, resultando:

$$\rho = 4 \pi a R \quad (2.9)$$

- Se  $b$  é pequeno comparado com  $a$ , o denominador tende a 2, ficando:

$$\rho = 2 \pi a R \quad (2.10)$$

Em realidade, na sua formulação Wenner considera o solo homogêneo. Assim, o produto entre o valor  $R$  medido pela aplicação do método (para cada espaçamento) e o fator geométrico  $K$  corresponde à resistividade desse solo. O fator geométrico varia com o espaçamento, mas o produto deve permanecer constante e igual ao valor da resistividade do solo. Entretanto, numa abordagem geral, o solo poder ser estratificado e, assim, o valor do produto deve, também, variar ao mudar-se o espaçamento. Logo, os dados obtidos a partir da aplicação do método não fornecem efetivamente o perfil da resistividade do solo, mas são utilizados para alcançar tal perfil. (VISACRO, FILHO, 2016)

Num solo homogêneo, quando se faz uma medição a um determinado valor “ $a$ ” de afastamento entre as hastes, deve-se considerar que o valor de resistividade obtido corresponde aproximadamente à resistividade do solo em uma profundidade de mesmo valor de “ $a$ ”. Isso é facilmente compreendido, quando se pensa que as superfícies equipotenciais aproximam-se de hemisférios (para distância entre

eletrodos da ordem dos espaçamentos usuais). Ao variar-se o valor do afastamento entre as hastes segundo uma direção, anotando-se as indicações sucessivas da resistividade medida, pode-se construir uma curva da resistividade do solo em função de sua profundidade. Quanto maior o afastamento “a”, mais profundos são os caminhos predominantes de corrente. (VISACRO, FILHO, 2016)

Entretanto, raramente tem-se solos realmente homogêneos. Na maior parte dos casos, os solos podem ser aproximados por um meio estratificado em duas camadas horizontais (e menos usualmente em três camadas). Nesse caso, ao aplicar-se o método, considerando-se pequenos espaçamentos entre os eletrodos, a corrente vai fluir bem superficialmente e os dados de medição são influenciados praticamente apenas pela resistividade da camada mais superficial do solo. Quanto maior o espaçamento, mais profundos são os caminhos de corrente no solo e, portanto, maior é a influência da resistividade em solo nas camadas mais fundas nos resultados de medição. Percebe-se, assim, que o valor do espaçamento guarda, ainda, uma relação com a profundidade, embora tal relação não seja linear. (VISACRO, FILHO, 2016)

Na parte prática da medição através do método de Wenner, como já falado anteriormente, é necessário cravar quatro hastes em linha reta, igualmente espaçadas e com as mesmas profundidades. Destas quatro hastes, as duas externas serviram para injetar corrente alternada no solo e as outras duas identificaram a queda de tensão causada pela resistência localizada entre as hastes internas, que por sua vez é possível encontrar utilizando a relação de tensão detectada com a corrente injetada. Conforme figura 2.8.

Na implementação do método de Wenner, as hastes verticais devem estar firmemente cravas, assegurando-se que a superfície condutora esteja em contato com o solo em toda sua extensão. A profundidade recomendada para as hastes é da ordem de 50 cm, sendo aconselhável um valor maior para terrenos arenosos, aterros e brejos, de forma a assegurar um contato íntimo eletrodo-solo. No caso de terrenos de grande resistência mecânica, algumas vezes é difícil alcançar tal valor, sendo aceitável profundidade um pouco menor. (VISACRO, FILHO, 2016)

É importante denotar a influência das hastes no resultado da medição. Cada haste apresenta uma resistência própria de aterramento, cujo valor é próximo (em intensidade) ao valor da resistividade do solo onde está colocada. Para caracterizar tal fato, basta aplicar a fórmula da resistência de uma haste na vertical

$\{R_T = (\rho/2\pi L) [\ln (4L/a) - 1]\}$  para o caso específico de uma haste de 50 cm e raio de 0,5 cm, dados típicos de hastes de medição:  $R_T \approx 0,9 \cdot \rho$ . Ora, isto significa que, no caso de solos de alta resistividade, a soma da resistência de aterramento das duas hastes de corrente, que estão em série com a fonte de tensão do instrumento de medição, pode limitar o valor da corrente no solo. (VISACRO, FILHO, 2016)

Por exemplo, num solo de 10.000  $\Omega \cdot m$ , a corrente que circula pelo solo pode ser limitada à ordem de 1 mA, se a fonte de tensão fornecer 20 V. Tal intensidade de corrente não é usualmente adequada à sensibilização dos circuitos de medição, que pode ocasionar a indicação de resultados falsos. (VISACRO, FILHO, 2016)

Diante desta situação, Filho ainda complementa:

[...] o problema é efetivamente sério no caso das hastes de corrente (1 e 4). As possíveis soluções para a questão podem residir no emprego de fontes de tensão de valor mais elevado, no recurso a uma configuração alternativa, apresentada diante, ou, em último caso, em práticas do tipo umedecimento do solo nas proximidades das hastes de corrente. Os cuidados não são tão críticos com relação às hastes de potencial (internas: 2 e 3), pois as mesmas não são percorridas pela corrente principal do circuito. Devido às altas impedâncias do circuito de medição de tensão, a corrente que circula pelo mesmo é muito reduzida, e a queda de tensão no aterramento de cada haste é desprezível em relação àquela que ocorre no circuito de medição. Isso determina que a queda de tensão nas duas hastes internas não influencie na tensão detectada pelas mesmas. (VISACRO, FILHO, 2016)

Quanto as distâncias entre as hastes, geralmente são utilizados valores sucessivos múltiplos de espaçamento: 1, 2, 4, 8, 16, 32, e 64 m. O Quadro 2.5 mostra os valores mais usuais de espaçamento e profundidade das hastes, com o valor da constante  $K$  para cada situação.

**Quadro 2.5** – Valores usuais para espaçamento e profundidade das hastes

a(m)	K		
	b(m)		
	0,4	0,5	0,6
2	13,39	13,81	14,29
4	25,56	25,80	26,08
8	50,48	50,60	50,75
16	100,64	100,70	100,77
32	201,11	201,14	201,18
64	402,11	402,11	402,11

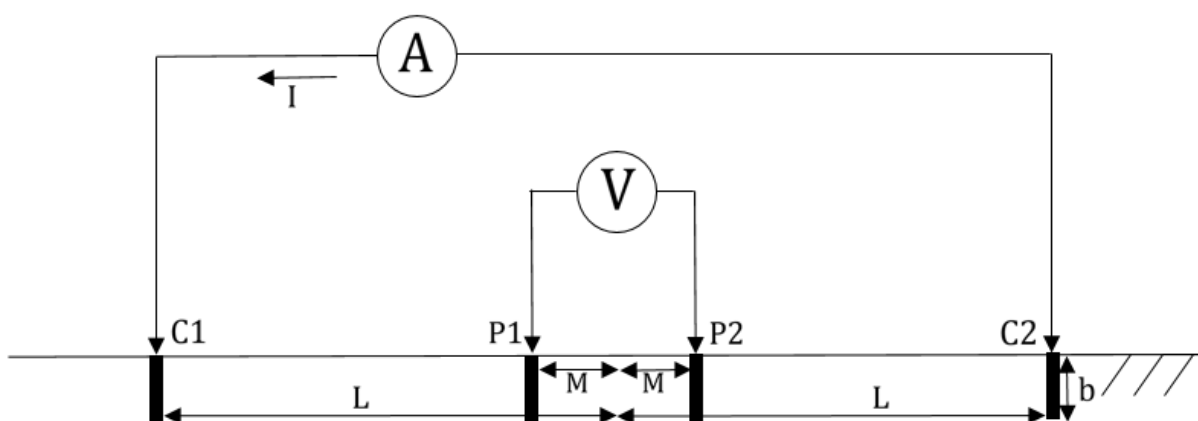
Fonte: (VISACRO, FILHO, 2016).

#### 2.4.2.2 Método de Schlumberger

Este método é bastante similar ao método de Wenner, o que o difere é “que neste caso os eletrodos exteriores são colocados a uma distância cinco vezes superior à distância entre os eletrodos internos” (FLORES, 2014).

Neste caso a representação da medição ficaria da seguinte forma:

**Figura 2.9** – Princípio de medição do método de Schlumberger



Fonte: (FLORES, 2014).

O método é recomendado para medições em que a área de interesse é relativamente grande, visto que “só pode ser utilizado para um espaçamento mínimo

de 10 m e, conseqüentemente, um espaçamento interno de 0.5 m, sendo que para distâncias menores, o método de Wenner é mais indicado” (FLORES, 2014).

Este método proporciona uma diminuição do tempo de medição considerável, quando comparado com o método de Wenner, uma vez que para realizar várias medições, de forma a obter um valor mais credível, apenas é necessário mover os dois elétrodos exteriores (de corrente). No caso do método de Wenner é necessário mover os quatro elétrodos. Esta é a principal vantagem do método em análise. (FLORES, 2014)

Neste caso, a fórmula da resistividade do solo passa a ter uma pequena variação, conforme equação a seguir:

$$\rho = \frac{\pi L^2 R}{2M} \quad (2.11)$$

Onde:

$\rho$  – resistividade do solo ( $\Omega.m$ );

$R$  – resistência medida ( $\Omega$ );

$L$  – metade do espaçamento entre os eletrodos de corrente (m);

$M$  – espaçamento entre os eletrodos de potencial (m).

### ➤ DIREÇÕES A SEREM MEDIDAS NO TERRENO

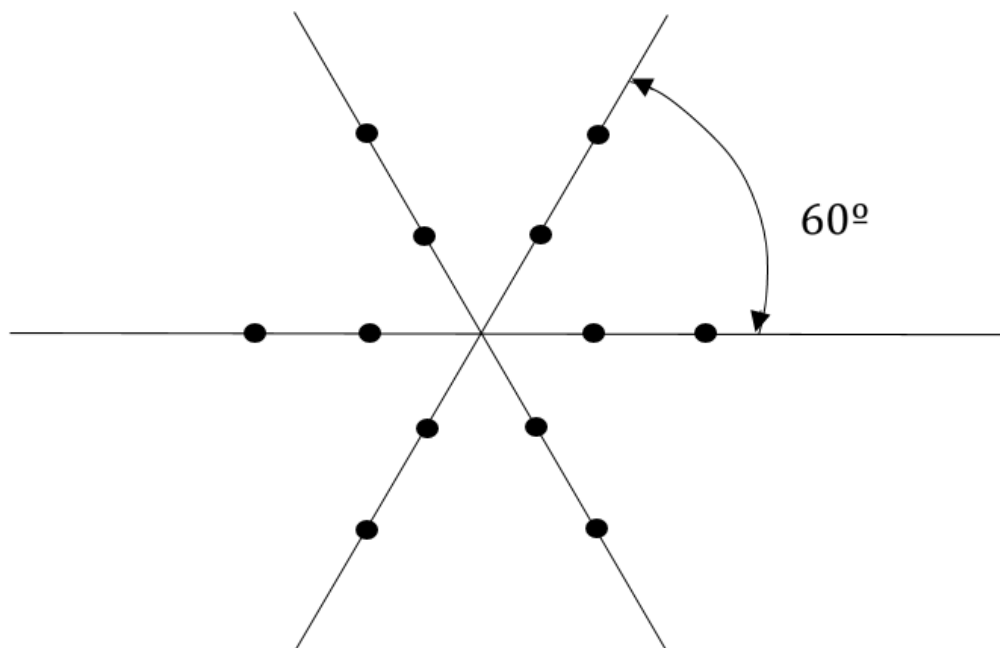
Apresentado os três métodos mais usuais para realizar a medição da resistividade do solo, agora é necessário verificar em qual direção e em quais pontos do terreno serão realizadas as medições.

No livro de (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995) relata que é necessário verificar primeiramente qual será o grau de importância do local do aterramento, a dimensão do sistema de aterramento e a variação acentuada dos valores medidos para os respectivos espaçamentos.

Nos casos em que exista apenas um único ponto de aterramento, devem ser feitas medidas em três direções diferentes, conforme ilustra a figura 2.10:



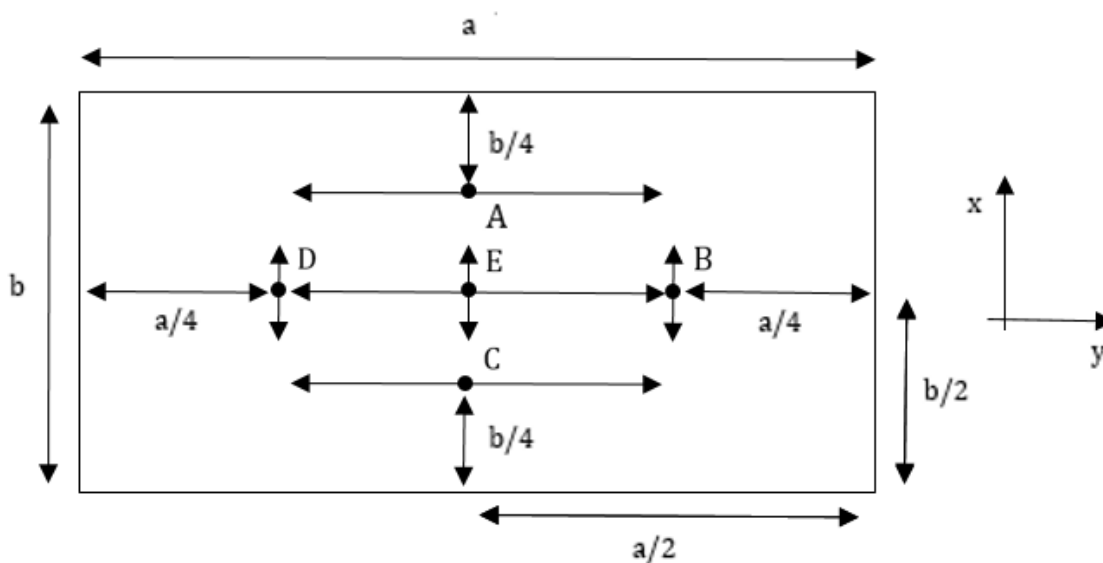
**Figura 2.10** – Direções do ponto de medição



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Para este caso em específico, são para sistemas de aterramento pequenos, onde há apenas um ponto que liga os equipamentos elétricos ao solo. Já para aterramentos de maiores proporções, como em casos de terrenos de cerca de 10.000 m<sup>2</sup>, recomenda-se no mínimo seis pontos de medições, segundo (VISACRO, FILHO, 2016). Conforme figura 2.11:

**Figura 2.11** – Pontos de medição para terrenos de 10.000 m<sup>2</sup>

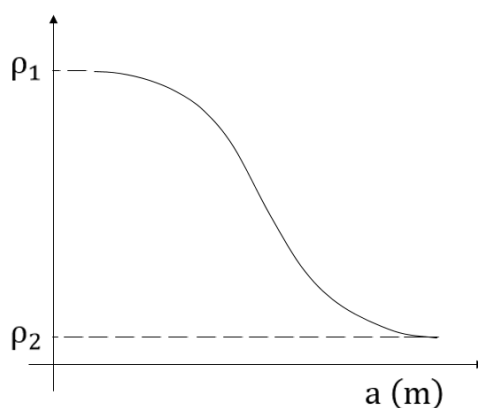


Fonte: (VISACRO, FILHO, 2016).

Se a geometria da área é diferente, deve-se traçar um retângulo imaginário circunscrito à mesma e local os cinco pontos como é representado na figura. Sugere-se, para área superior a 10.000m<sup>2</sup>, a divisão desta em retângulos menores, procedendo da mesma maneira para medir cada um deles. Em aterramentos pontuais devem ser efetuadas duas medições ortogonais nos pontos em questão. Para linhas de transmissão, as medições devem ser efetuadas na direção ao longo do seu percurso. Outras disposições podem ser empregadas, em função dos resultados obtidos, inclusive quando detectar-se erros, como, por exemplo, aqueles causados por materiais condutores enterrados (nesse caso a leitura do instrumento não varia) {39}. Para cada uma dessas direções pode-se traçar uma curva de resistividade em função do espaçamento. (VISACRO, FILHO, 2016)

No fim das medições, para se construir o modelo estratificado do solo, é comum tomar-se, para cada espaçamento, os valores médios das resistividades obtidas nas diversas direções. O Gráfico 2.1 esboça um solo estratificado em duas camadas, onde a resistividade da 1ª camada é maior que a segunda.

**Gráfico 2.1** – Solo estratificado em duas camadas



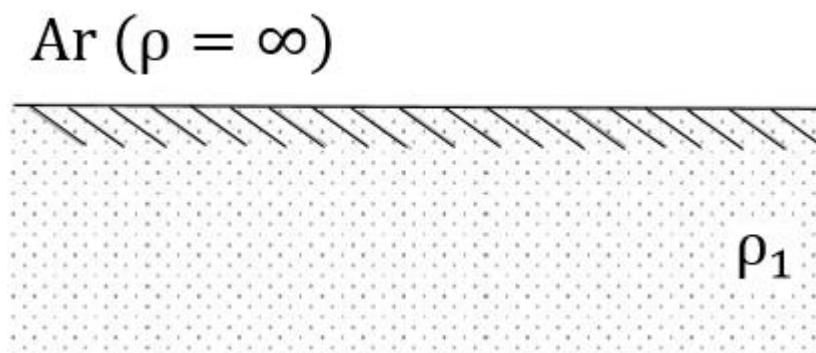
Fonte: autoria própria.

## 2.5 Estratificação do solo

Partindo da consideração de que, normalmente, todo solo possui características heterogênea, é conveniente utilizar sua modelagem em camadas estratificadas, ou seja, em camadas horizontais. Assim podemos obter um modelo mais próximo da realidade possível. Primeiramente, vamos entender o modelo de um solo uniforme, para então partirmos para as estratificações de duas ou mais camadas.

Para a representação do solo uniforme, é considerado que a sua resistividade será sempre a mesma, independente de quantas medições foram realizadas, a Figura 2.12 representa um solo homogêneo.

**Figura 2.12** – Representação de um solo homogêneo



Fonte: (FLORES, 2014).

No entanto, na prática, esta característica de uniformidade raramente é encontrada. Dessa forma, para representar a resistividade aproximada do modelo do solo homogêneo, deve-se encontrar uma média aritmética dos valores resultantes das medições realizadas em várias direções e espaçamento dos eletrodos. A Equação 2.12 mostra como encontrar este modelo aproximado.

$$\rho = \frac{\rho(1) + \rho(2) + \rho(3) + \rho(4) + \dots + \rho(n)}{n} \quad (2.12)$$

Onde:

$\rho$  – resistividade aproximada de um solo homogêneo;

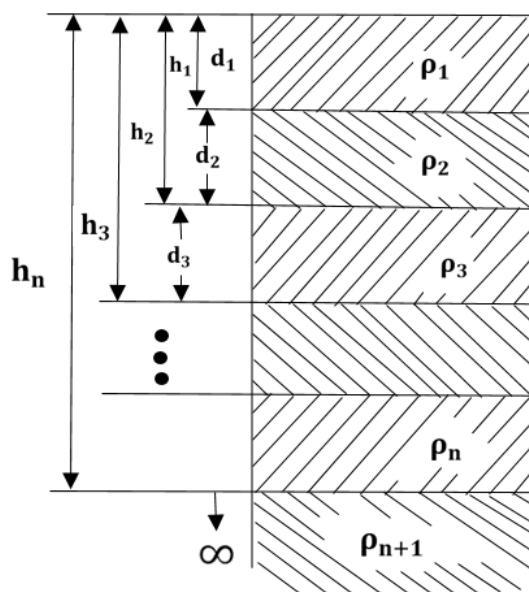
$\rho(1) + \rho(2) + \rho(3) + \rho(4) + \dots + \rho(n)$  – valores dos resultados das medições;

$n$  – quantidade de medições.

No entanto, grande parte dos solos não satisfaz as condições necessárias para ser aplicado este modelo, uma vez que, na maioria das vezes, a resistividade varia significativamente de medição para medição. Surge assim a necessidade de estudar um modelo para solos com diferentes camadas. (FLORES, 2014)

Compreendido a forma de representação do solo em uma camada, podemos iniciar os estudos acerca da estratificação do solo. A Figura 2.13 ilustra o que seria a estratificação do solo em camadas horizontais, onde a cada profundidade “h” tem-se uma resistividade diferente.

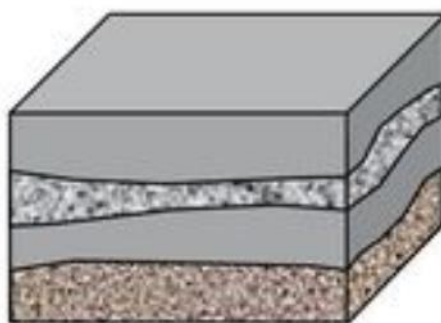
**Figura 2.13** – Estratificação do solo



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Utilizando os valores de  $\rho$  e de  $a$ , obtidos a partir das medições no solo, vamos entender os principais métodos de modelagem do solo, ou estratificação

**Figura 2.14** – Solo Dividido em Camadas



Fonte: (Orientações para dimensionamento da malha de aterramento do SPDA, 2017).

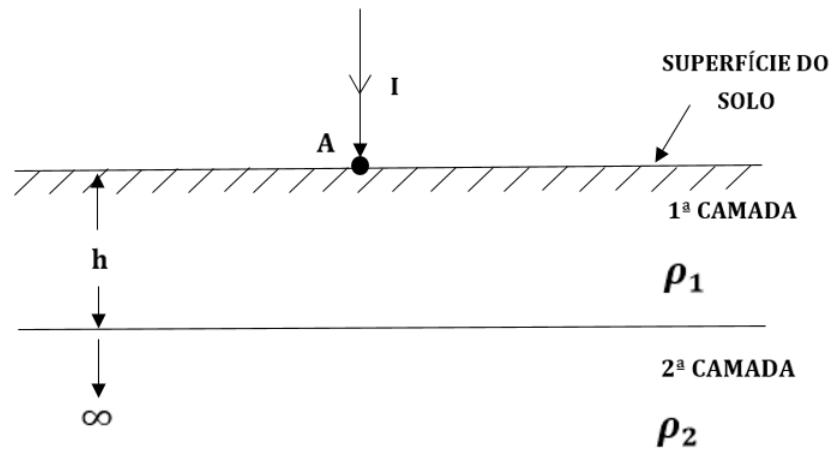
### ➤ **MODELAGEM DO SOLO DE DUAS CAMADAS**

Por intermédio dos conhecimentos acerca do eletromagnetismo, (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995) diz que nos solos em que existe duas camadas horizontais, é possível modelá-lo matematicamente, utilizando os valores obtidos nos resultados das medições pelo Método de Wenner, permitindo encontrar a resistividade do solo das duas camadas, assim como as profundidades de cada uma.

A Figura 2.15 ilustra uma corrente elétrica  $I$  entrando pelo ponta **A**, em um

solo com duas camadas, gerando potenciais na 1ª camada:

**Figura 2.15** – Solo em duas camadas



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

A partir do potencial gerado na 1ª camada, distanciado de “ $r$ ” da fonte de corrente **A**, (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995) demonstra a expressão que encontra o valor de potencial de um ponto qualquer da 1ª camada com relação ao infinito.

$$V_p = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (2.13)$$

Onde:

$V_p$  – é o potencial de um na 1ª camada;

$\rho_1$  – resistividade da 1ª camada;

$h$  – profundidade da 1ª camada;

$r$  – distância do ponto à fonte de corrente **A**;

$K$  – coeficiente de reflexão, dado por:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad (2.14)$$

$\rho_2$  – resistividade da 2ª camada.

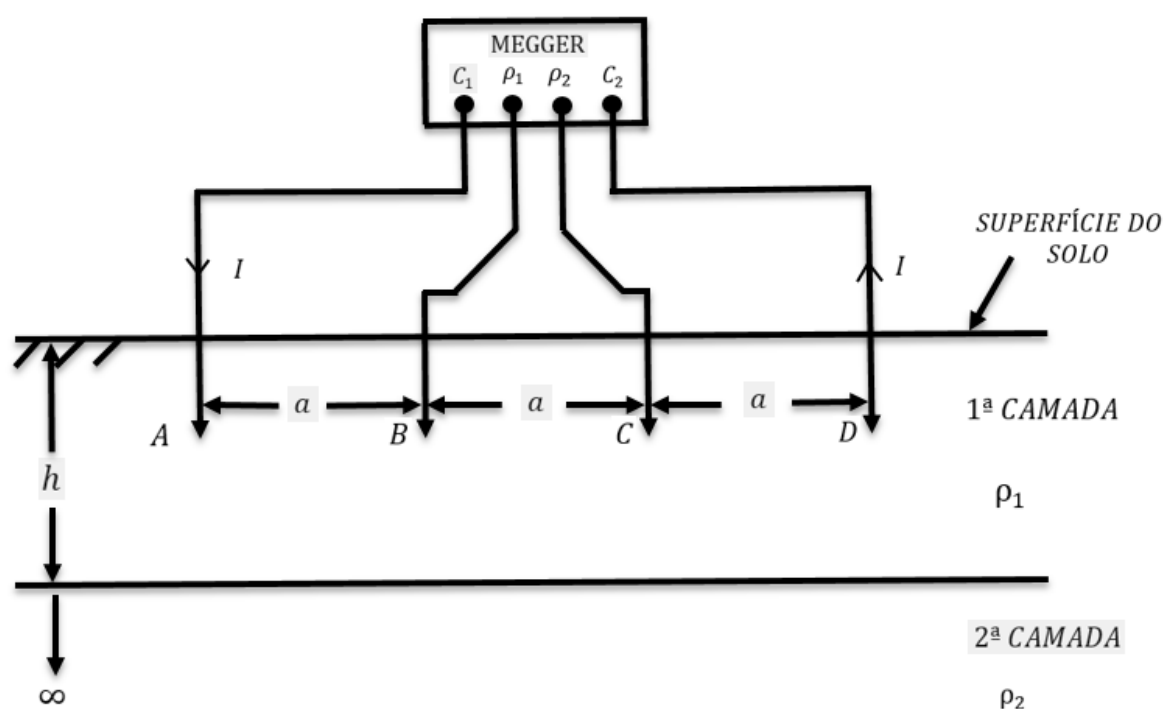
Logo, podemos considerar que:

$$-1 \leq K \leq +1 \quad (2.15)$$

### ➤ CONFIGURAÇÃO DE WENNER

Utilizando o entendimento da modelagem do solo em duas camadas, podemos aplicar a Equação 2.14 na configuração de Wenner, segundo (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995) a corrente elétrica  $I$  entra no solo por meio do ponto **A** e volta até a fonte pelo ponto **D**. Já os pontos **B** e **C** são eletrodos de potencial. Conforme Figura 2.16.

**Figura 2.16** – Configuração de Wenner em solo de duas camadas



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

O livro de (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995) mostra ainda que, após análises do método, a resistividade elétrica do solo, para o espaçamento “ $a$ ” é dado pelas seguintes equações:

$$\rho(a) = 2\pi a R \quad (2.16)$$

$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \frac{h}{a})^2}} \quad (2.17)$$

Onde:

$\rho_1$  – resistividade da camada superior ( $\Omega\text{m}$ );

$K$  – fator de reflexão;

$h$  – profundidade da camada superior(m);

$n$  – número de medições;

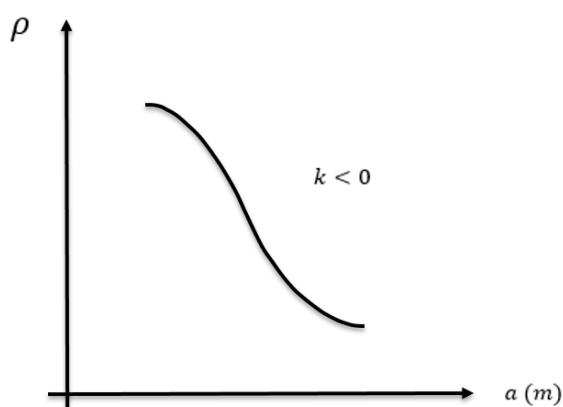
$a$  – espaçamento entre os eletrodos (m).

Utilizando a expressão da Equação 2.17, podemos trabalhar em formas de modelagem do solo para duas camadas. Comumente é usado o método de duas camadas por meio de curvas.

### ➤ MÉTODO DE DUAS CAMADAS POR MEIO DE CURVAS

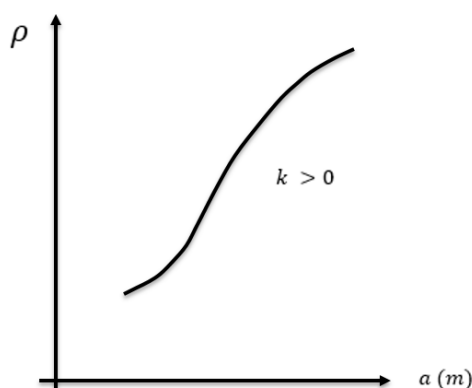
Como já visto, o intervalo de diferença do coeficiente de reflexão é baixo, e está definida entre +1 e -1. Possibilita-se portanto, esboçar uma família de curvas de  $\frac{\rho(a)}{\rho_1}$  em função de  $\frac{h}{a}$  para uma série de dados de  $K$  positivos e negativos, cobrindo todo o seu intervalo de variação. As curvas esboçadas para  $K$  variando no intervalo negativo, isto é, curva  $\rho(a) \times a$  descendente. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995) Conforme ilustra a Figura 2.17. Kindermann e Campagnolo diz ainda que, para valores positivos de  $K$ , a curva  $\rho(a) \times a$  é ascendente, conforme ilustra a Figura 2.18.

**Figura 2.17** – Curvas de  $\rho(a) \times a$  Descendente



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

**Figura 2.18** – Curva de  $\rho(a)$  x  $a$  Ascendente



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Os autores explicam ainda como estabelecer um casamento da curva  $\rho(a)$  x  $a$ , medida por Wenner, com uma específica curva particular. Onde, a curva particular é conhecida pelos valores de  $\rho_1$ ,  $\mathbf{K}$  e  $\mathbf{h}$ . Desta maneira encontra-se os valores e a estratificação estará pronta. São os passos expostos por (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995):

**1º passo:** Traçar em um gráfico a curva  $\rho(a)$  x  $a$  obtida pelo método de Wenner;

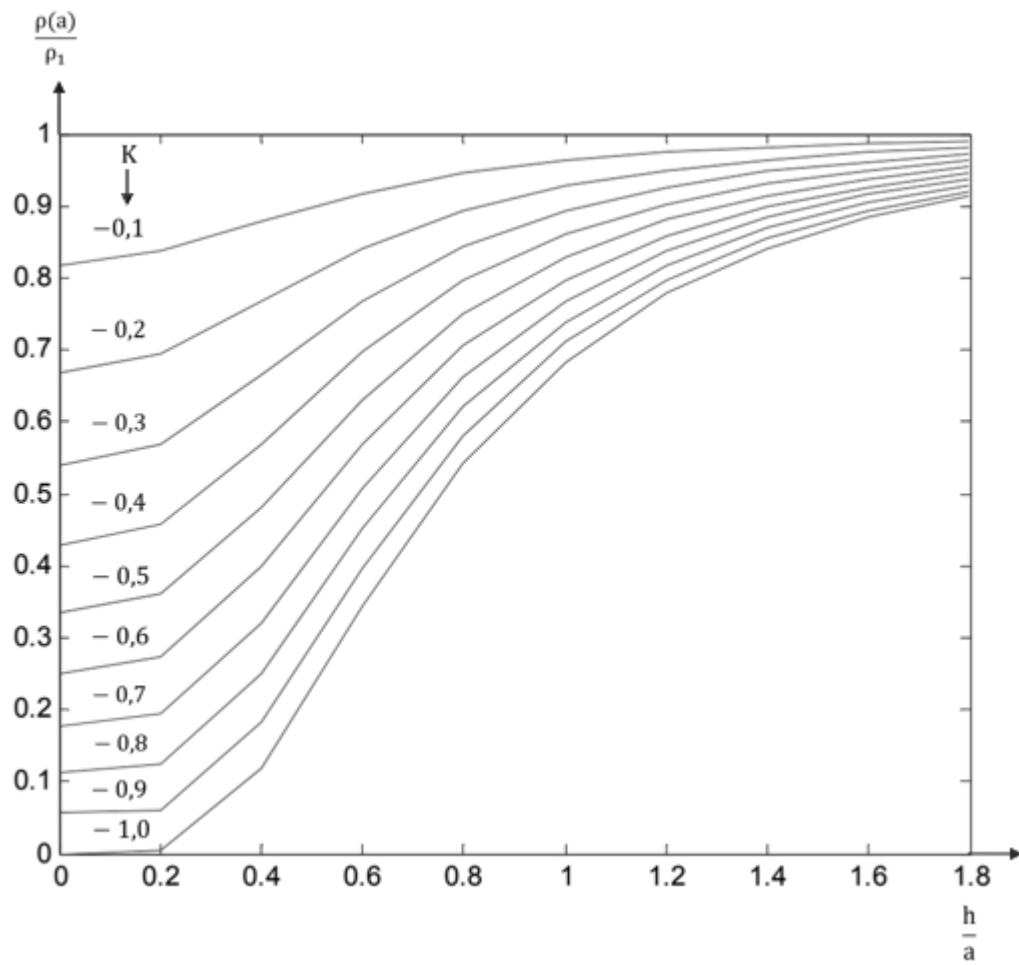
**2º passo:** Prolongar a curva  $\rho(a)$  x  $a$  até cortar o eixo das ordenadas do gráfico. Neste ponto, é lido diretamente o valor de  $\rho_1$ , isto é, a resistividade da primeira camada. Para viabilizar este passo, recomenda-se fazer várias leituras pelo método de Wenner para pequenos espaçamentos. Isto se justifica porque a penetração desta corrente dá-se predominantemente na primeira camada.

**3º passo:** Um valor de espaçamento  $a_1$  é escolhido arbitrariamente, e levado na curva para obter-se o correspondente valor de  $\rho(a_1)$ .

**4º passo:** Pelo comportamento da curva  $\rho(a)$  x  $a$ , determina-se o sinal de  $\mathbf{K}$ , Isto é:

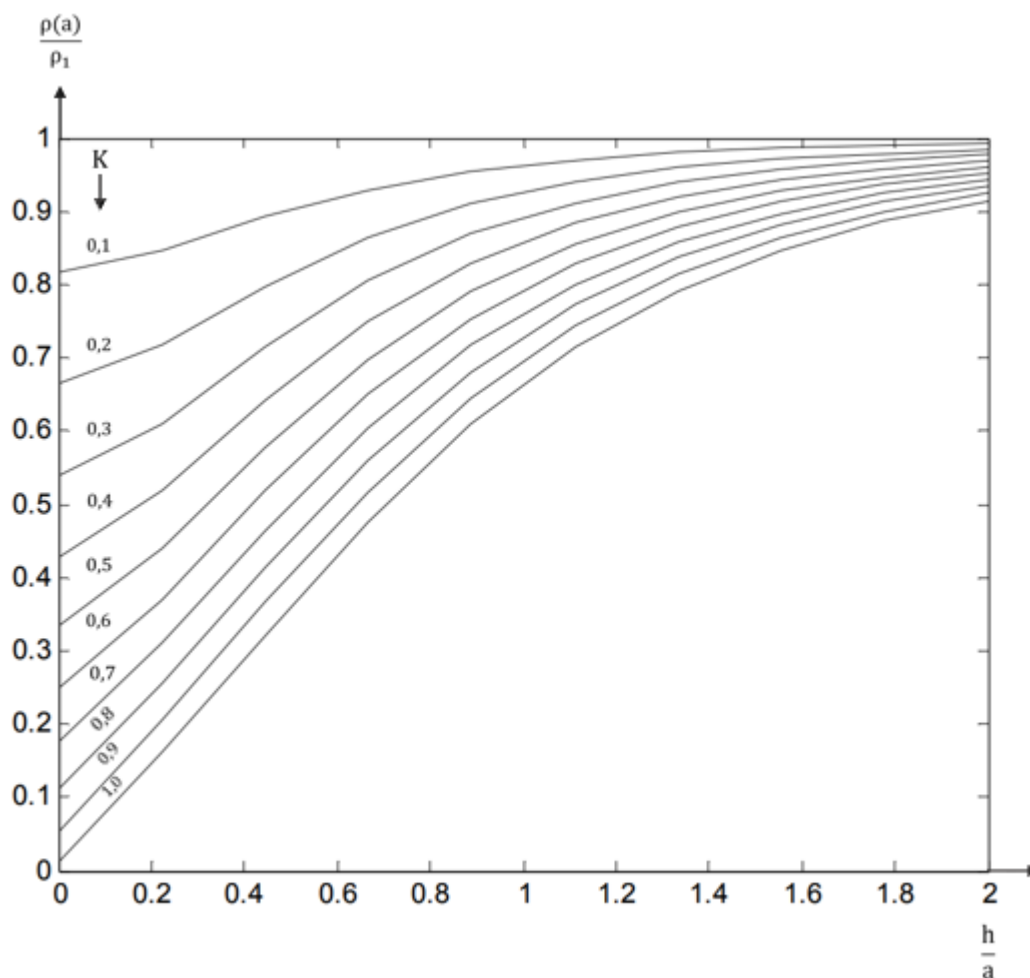
- Se a curva for descendente, o sinal de  $\mathbf{K}$  é negativo e efetua-se o cálculo de  $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1}$ ;
- Se a curva for ascendente, o sinal de  $\mathbf{K}$  é positivo e efetua-se o cálculo de  $\frac{\rho_1}{\rho(a_1)}$ .



**Figura 2.19** – Curva para **K** negativos

Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Figura 2.20 – Curva para K positivos



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

**5º passo:** Com o valor de  $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1}$  ou  $\frac{\rho_1}{\rho(a_1)}$  obtido, entra-se nas curvas teóricas correspondentes e traça-se uma linha paralela ao eixo da abcissa. Esta reta corta curvas distintas de  $K$ . Proceder a leitura de todos os específicos  $K$  e  $\frac{h}{a}$  correspondentes.

**6º passo:** Multiplica-se todos os valores de  $\frac{h}{a}$  encontrados no quinto passo pelo valor de  $a_1$  do terceiro passo. Assim, com o quinto e sexto passo, gera-se uma tabela com os valores correspondentes de  $K$ ,  $\frac{h}{a}$  e  $h$ .

**7º passo:** Plota-se a curva  $K \times h$  dos valores obtidos da tabela gerada no sexto passo.

**8º passo:** Um segundo valor de espaçamento  $a_2 \neq a_1$  é novamente escolhido, e todo o processo é repetido, resultando numa nova curva  $K \times h$ .

**9º passo:** Plota-se esta nova curva  $K \times h$  no mesmo gráfico do sétimo passo.

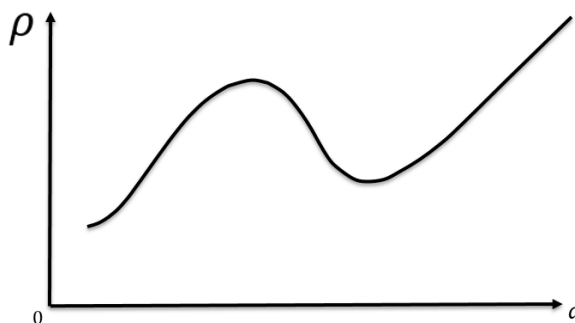
**10º passo:** A intersecção das duas curvas  $K \times h$  num dado ponto

resultará nos valores reais de **K** e **h**, e a estratificação estará definida.

### ➤ MÉTODO DE ESTRATIFICAÇÃO DE SOLO COM VÁRIAS CAMADAS

Para este tipo de estratificação, a curva  $\rho(a) \times a$  apresenta várias ondulações, a depender da quantidade de camadas do solo. Podendo ter partes em descendentes e ascendentes da curva, de acordo como mostra a Figura 2.21.

**Figura 2. 21** – Curva  $\rho(a) \times a$  de um solo que possui várias camadas



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Dividindo a curva  $\rho(a) \times a$  em trechos típicos dos solos de duas camadas, é possível então, empregar métodos para a estratificação do solo com várias camadas, fazendo uma extensão da modelagem do solo de duas camadas. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

Um dos métodos mais utilizados para realizar a estratificação do solo em diversas camadas é o Método de Pirson.

**Método de Pirson:** Considerado como uma extensão do método de duas camadas, é realizado várias análises para cada sequência de curvas  $\rho(a) \times a$ . Vejamos o que a literatura diz:

O **Método de Pirson** pode ser encarado como uma extensão do método de duas camadas. Ao se dividir a curva  $\rho(a) \times a$  em trechos ascendentes e descendentes fica evidenciado que o solo de várias camadas pode ser analisado como uma sequência de curvas de solo equivalentes a duas camadas. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

Ainda complementa que:

Considerando o primeiro trecho como um solo de duas camadas, obtém-se  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  e  $h_1$ . Ao analisar-se o segundo trecho, deve-se primeiramente determinar uma resistividade equivalente, vista pela terceira camada. Assim, procura-se obter a resistividade  $\rho_3$  e a profundidade da camada equivalente. E assim sucessivamente, seguindo a mesma lógica. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

Abaixo estão elencados os passos para realizar a estratificação, segundo (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995):

**1º passo:** Traçar um gráfico a curva  $\rho(a) \times a$  obtida pelo método de Wenner.

**2º passo:** Dividir a curva em trechos ascendentes e descendentes, isto é, entre os seus pontos máximos e mínimos.

**3º passo:** Prolonga-se a curva  $\rho(a) \times a$  até interceptar o eixo das ordenadas do gráfico. Neste ponto é lido o valor de  $\rho_1$ , isto é, a resistividade da primeira camada.

**4º passo:** Em relação ao primeiro trecho da curva  $\rho(a) \times a$ , característica de um solo de duas camadas, procede-se então toda a sequência indicada no método de duas camadas usando curvas. Encontrando-se, assim, os valores de **p2** e **h1**.

**5º passo:** Para o segundo trecho, achar o ponto de transição ( $a_1$ ) onde  $\frac{d\rho}{da}$  é máxima, isto é, onde  $\frac{d^2\rho}{da^2} = 0$ . Este ponto da transição está localizado onde a curva muda a sua concavidade.

**6º passo:** Considerando o segundo trecho da curva  $\rho(a) \times a$ , deve-se achar a resistividade equivalente vista pela terceira camada, assim estima-se a profundidade da segunda camada ( $\hat{h}_2$ ), pelo método de Lancaster-Jones, isto é:

$$\hat{h}_2 = d_1 + \hat{d}_2 = \frac{2}{3} a_t \quad (2.18)$$

Onde:

$d_1 = h_1$  = Espessura da primeira camada

$\hat{d}_2$  = Espessura estimada da segunda camada

$\hat{h}_2$  = Profundidade estimada da segunda camada

$a_t$  = É o espaçamento correspondente ao ponto de transição do segundo trecho. Assim, obtém-se o valor estimado de  $\hat{h}_2$  e  $\hat{d}_2$ .

**7º passo:** Calcular a resistividade média equivalente estimada ( $\hat{\rho}_2^1$ ) vista pela terceira camada, utilizando a **Fórmula de Hummel**, que é a média harmônica ponderada da primeira e segunda camada.

$$\hat{\rho}_2^1 = \frac{d_1 + \hat{d}_2}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{\hat{d}_2}{\rho_2}} \quad (2.19)$$

O  $\hat{\rho}_2^1$  se apresenta como o  $\rho_1$  do método de duas camadas.

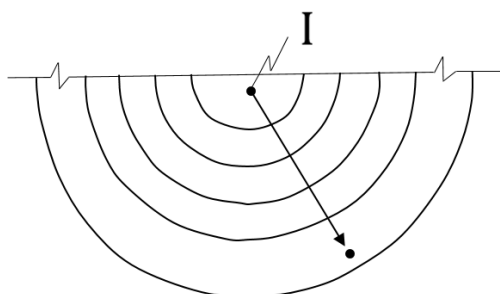
**8º passo:** Para o segundo trecho da cura, repetir todo o processo de duas camadas visto no método de duas camadas usando curvas, considerando  $\hat{\rho}_2^1$  a resistividade da primeira camada. Assim, obtém-se os novos valores estimados de  $\hat{\rho}_3$  e  $\hat{h}_2$ .

## 2.6 Cálculo da Resistência de Terra

O cálculo exato da resistência de aterramento requer a realização de desenvolvimentos analíticos, que podem ser mais simples ou complicados, consoante a configuração dos eletrodos. A resistência de aterramento é definida pela relação entre a elevação de potencial referida ao infinito e a corrente que a gerou. (VISACRO, FILHO, 2016)

Para o desenvolvimento das expressões, será considerado um fluxo de corrente para um solo homogêneo através de um eletrodo com formato hemisférico, conforme Figura 2.22 abaixo:

**Figura 2.22** – Modelo de solo homogêneo em fatias



Fonte: (VISACRO, FILHO, 2016).

A figura ilustra um modelo em que “o solo é aproximado por um conjunto de fatias hemisféricas de mesma espessura ( $\Delta d$ ) e resistividade, cuja área cresce à medida que se afasta do eletrodo ( $A = 2\pi r^2$ )” (VISACRO, FILHO, 2016). Para cada fatia do solo, representa o valor de uma resistência, e realizando a soma delas até uma distância infinita obtemos o valor da resistência de aterramento. A Equação 2.20 demonstra este somatório.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (2.20)$$

Para se considerar os potenciais estabelecidos no solo devido ao fluxo de corrente através do eletrodo, deve-se ressaltar que a corrente ( $I$ ), que se distribui radicalmente e que atravessa cada fatia (em direção ao infinito), é a mesma. Assim, a queda de tensão que ocorre em cada fatia ( $\Delta V_i = R_i \cdot I$ ) vai decrescendo à medida que se afasta do eletrodo, pois a resistência da fatia também decresce, devido ao aumento da área atravessada. Admitindo-se um potencial nulo no infinito, o valor do potencial aumenta à medida que se aproxima do eletrodo, devido à queda de tensão no percurso considerado no solo. Percebe-se, ainda, que tal crescimento do potencial tem derivada crescente, pois a contribuição (em queda de tensão) para composição

do potencial é tanto maior quanto mais próxima do eletrodo está a fatia [...] (VISACRO, FILHO, 2016)

Assim, a medida que distanciamos o eletrodo, menor será o valor da resistência, devido ao aumento da área atravessada. A Equação 2.21 e 2.22 mostra como ficaria o perfil de potencial no solo.

$$V_T = R_T \cdot I = (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n) \cdot I \quad (2.21)$$

$$I \cdot R_1 > I \cdot R_2 > I \cdot R_3 > I \cdot R_4 > \dots > I \cdot R_n \quad (2.22)$$

Utilizando o exemplo da Figura 2.22 (VISACRO, FILHO, 2016) mostra em seus estudos que, a partir de um ponto x, a uma certa distância ( $r_x$ ) da fonte de corrente ilustrada, calcula-se o potencial gerado. Obtendo a seguinte expressão:

$$V_{r_x} = \frac{\rho}{2\pi r_x} I \quad (2.23)$$

Considerando que tal ponto x na superfície é um eletrodo, é possível encontrar potencial no eletrodo em relação ao infinito, e depois o valor da resistência de aterramento. Senão vejamos as Equações expostas por (VISACRO, FILHO, 2016):

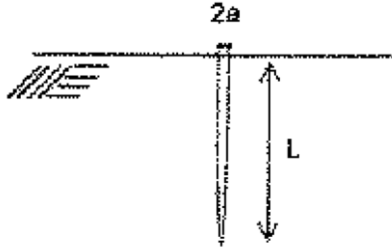
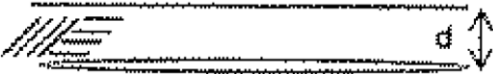
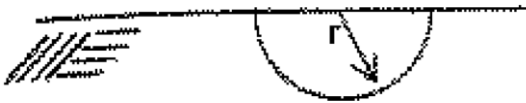

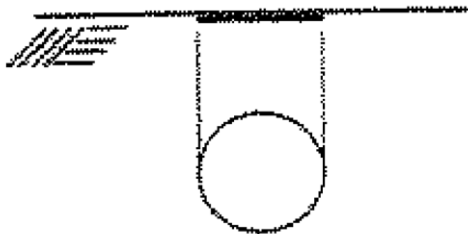

$$V_{eletrodo} = \frac{\rho}{2\pi r_{eletrodo}} I \quad (2.24)$$



$$R_T = \frac{V_{eletrodo}}{I} \quad (2.25)$$

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi r_{eletrodo}} \quad (2.26)$$

A determinação da resistência de aterramento de outras configurações de aterramento segue o mesmo procedimento básico. A diferença fica por conta da forma de distribuição da densidade de corrente no solo, que depende da forma e dimensão do eletrodo e que determina uma formulação específica para o campo elétrico. A integração do mesmo no percurso entre um ponto infinitamente afastado e a superfície do eletrodo fornece o seu potencial. Dividindo-se tal potencial pela corrente, obtém-se o valor da resistência. Na tabela a seguir são apresentadas as expressões para cálculo da resistência de aterramento de algumas configurações típicas de aterramento. (VISACRO, FILHO, 2016)

Quadro 2.6 – Configurações Típicas de Aterramento

Eletrodo	Tipo / Expressão
	<p>Haste vertical</p> $R_T = \frac{\rho}{2\pi L} \left( L \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
	<p>Eletrodo horizontal</p> $R_T = \frac{\rho}{2\pi L} \left( L \ln \frac{2L}{a} + L \ln \frac{4L}{d} - 2 + \frac{2d}{L} + \dots \right)$
	<p>Semi-esfera ao nível do solo</p> $R_T = \frac{\rho}{2\pi r}$
	<p>Esfera colocada à profundidade "d"</p> $R_T = \frac{\rho}{4\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{2d} \right)$
	<p>Disco horizontal ao nível do solo</p> $R_T = \frac{\rho}{4r}$
	<p>Disco vertical à profundidade "d"</p> $R_T = \frac{\rho}{8r} + \frac{\rho}{8\pi d} \left( 1 + \frac{7}{24} + \frac{r^2}{4d^2} + \dots \right)$

	<p>Disco horizontal à profundidade “d”</p> $R_T = \frac{\rho}{8r} + \frac{\rho}{8\pi d}$
	<p>Superfície quadrada vertical</p> <p>Mesma resistência que a de um disco de mesma área, colocado à mesma profundidade</p>

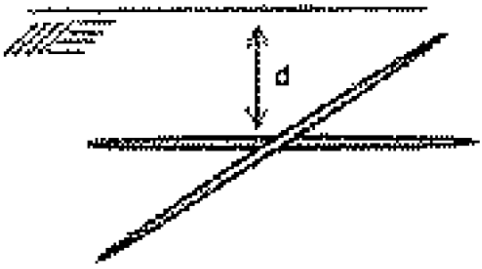
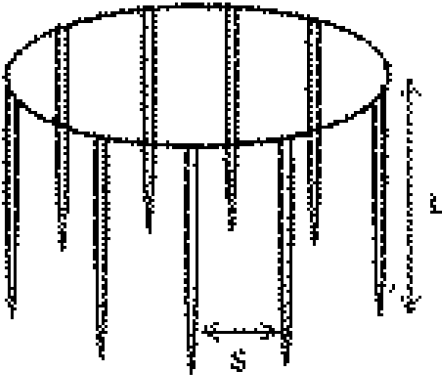
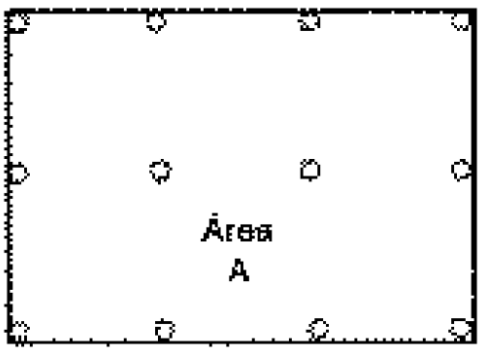
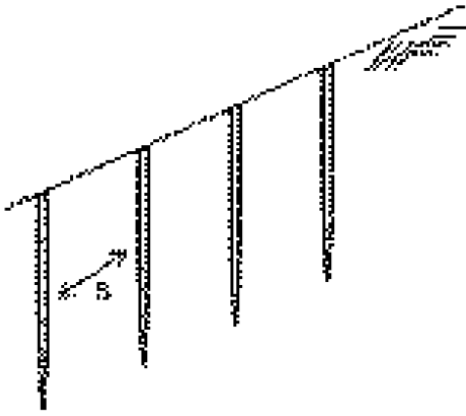
Fonte: (VISACRO, FILHO, 2016).

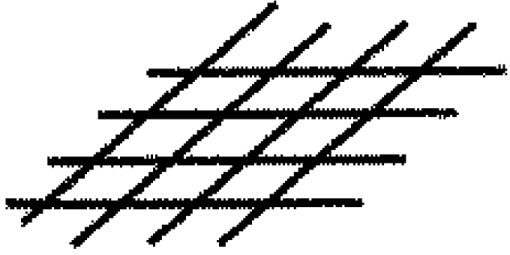
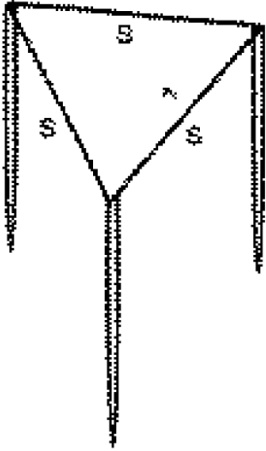
Alguns tipos de aplicação requerem que o aterramento possua valor muito reduzido de resistência. Em muitos casos não é possível alcançar tal valor com um único eletrodo, nas condições específicas de resistividade do solo local. Isso pode justificar a composição de sistemas de aterramento, constituídos pela interligação de diferentes eletrodos, dispostos de forma diversa, dependendo das peculiaridades. (VISACRO, FILHO, 2016)

Dessa forma, nos casos em que a resistividade necessita ser bastante reduzida, é necessário o emprego de vários eletrodos em um sistema só, de modo que aumente o contato da rede com o solo. A tabela a seguir foi retirada de (VISACRO, FILHO, 2016), onde apresenta alguns típicas configurações de aterramento e seus respectivas equações.



Quadro 2.7 – Expressões Típicas de Aterramento

Eletrodo	Tipo / Expressão
	<p>Estrela de 4 pontos colocada num plano horizontal de profundidade “d” (raio do eletrodo: a)</p> $R_T = \frac{\rho}{8\pi L} \left( L n \frac{2L}{a} + L n \frac{L}{d} + 2,91 - 1,07 \frac{2d}{L} \dots \right)$
	<p>n hastes verticais dispostas em círculo (s &gt;&gt; L)</p> $R_T = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left( L n \frac{4L}{a} - 1 + \frac{L}{d} L n \frac{2n}{\pi} \right)$
	<p>n hastes verticais dispostas uniformemente na área A</p> $R_T = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left[ L n \frac{4L}{a} - 1 + 2 \frac{K_1 L}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$ <p><math>K_1</math> = constante que depende da profundidade da parte superior da hastes</p>
	<p>n hastes verticais dispostas em linha reta (s &gt;&gt; L)</p> $R_T = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left( L n \frac{4L}{a} - 1 \frac{L}{d} L n \frac{1,781n}{2,718} \right)$

	<p>Malha constituída por reticulado formado com eletrodos horizontais, cobrindo a área A e comprimento total de condutores L</p> $R_T \cong 0,443 \frac{\rho}{\sqrt{A}} + \frac{\rho}{L}$
	<p>Conjunto de 3 hastes verticais interligadas, dispostas no vértice de um triângulo equilátero (aplicação típica de aterramento de para-raios)</p> $R_T = R_{11} \frac{1 + 2r/s}{3}$ $R_{11} = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$ $\frac{\rho}{2\pi r} = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$ <p>r: raio do hemisfério que possui o mesmo valor de resistência de uma haste (<math>R_{11}</math>)</p>

Fonte: (VISACRO, FILHO, 2016).

## 2.7 Técnicas típicas para melhorar a resistência de aterramento

Em um planejamento de um sistema de aterramento, é comum encontrar solos que possui uma alta resistividade, o que acaba se tornando um fator que dificulta a instalação do aterramento e aumenta os custos significativos no projeto. Nesse caso, podemos recorrer a outros métodos para reduzir o valor da resistividade do solo, são eles:

- **Tratamento químico do solo**

A adição de sais na terra circunvizinha a um aterramento diminui sua resistividade e, conseqüentemente, a sua resistência de terra. É comum o emprego de cloreto de sódio ou sulfato de cobre ou, ainda, de produtos químicos industrializados com essa finalidade. Nesse tratamento deve-se cuidar que os sais não entrem em contato direto com o eletrodo para evitar a corrosão, e também manter

um controle do valor da resistência de terra, pois este pode aumentar com o tempo devido à dispersão dos sais pelo solo. (VISACRO, FILHO, 2016)

Esta prática pode ser muito eficiente para aterramentos de pequena dimensão. Embora a redução da resistividade seja promovida apenas nas proximidades dos eletrodos, é justamente esta porção do solo que é responsável pela maior parcela da resistência de aterramento. Reduções superiores a 50% do valor da resistência de aterramento podem ser obtidas, se a dimensão do sistema é muito pequena (por exemplo, umas poucas hastes). Entretanto, no caso de aterramentos extensos, como é o caso de malhas de subestação, raramente se alcança redução superior a 15% no valor da resistência com o tratamento químico. (VISACRO, FILHO, 2016)

- **Tratamento físico do solo**

Este tipo de tratamento “Consiste em envolver o eletrodo com material condutor fazendo como que uma ampliação de sua superfície de contato com a terra adjacente. Os materiais mais empregados são a sucata e o carvão” (VISACRO, FILHO, 2016).

## 2.8 Resistência aparente de aterramento para hastes

Devido a quantidade de camadas que o solo pode apresentar, muitas vezes, para calcular a resistência de aterramento, é necessário encontrar a(s) resistividade(s) aparente(s) que “representa a integração entre o sistema de aterramento relativo ao seu tamanho em conformidade com o solo” (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

O tamanho do sistema de aterramento corresponde à profundidade de penetração das correntes escoadas. Esta penetração determina as camadas do solo envolvidas com o aterramento, e conseqüentemente, a sua resistividade aparente. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

Assim, é possível definir uma resistividade, chamada aparente, que é a resistividade vista pelo sistema de aterramento em integração com o solo, considerada a profundidade atingida pelas dispersões das correntes elétricas indesejáveis. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

Colocando-se um sistema de aterramento com a mesma geometria em solos distintos, ele terá resistências elétricas diferentes. Isto se dá porque a resistividade que o solo apresenta a este aterramento é diferente. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

No estudo, é apresentado a equação genérica para qualquer sistema de aterramento:

$$R_{\text{aterramento}} = \rho a f(g) \quad (2.27)$$

Onde:

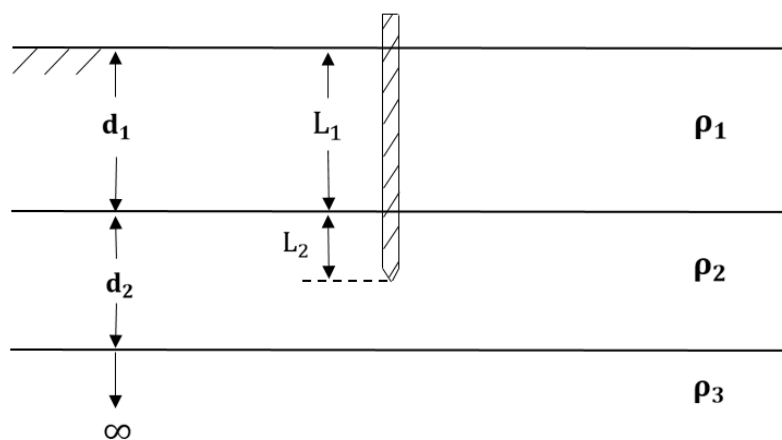
$R_{\text{aterramento}}$  – Resistência elétrica;

$\rho a$  – Resistividade aparente;

$f(g)$  – Função que depende da configuração do sistema colocado no solo.

Para encontrarmos de ( $\rho a$ ) é necessário utilizar a fórmula de Hummel:

**Figura 2.23** – Eletrodo Cravado no Solo Estratificado



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

$$\rho a = \frac{L_1 + L_2}{\frac{L_1}{\rho_1} + \frac{L_2}{\rho_2}} \quad (2.28)$$

## 2.9 Redução das Camadas

Segundo (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995), o método para a obtenção da resistividade aparente acima exposta serve para calcular apenas nos casos em que o solo está representado em duas camadas, e quando o sistema é

composto somente por hastes. Logo, caso o solo a ser estratificado necessite modelagem em mais de duas camadas, é necessário realizar um procedimento de redução de camadas, de modo que depois possa ser encontrado a resistividade aparente ( $\rho_a$ ).

O procedimento de redução é feito a partir da superfície, considerando-se o paralelismo entre cada duas camadas, usando a fórmula de Hummel [...] que transforma diretamente o solo em duas camadas equivalentes. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

A representação, tanto da resistividade equivalente das camadas quanto da espessura equivalente das camadas, segue abaixo:

$$\rho_{eq} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\rho_i}} \quad (2.29)$$

$$d_{eq} = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n = \sum_{i=1}^n d_i \quad (2.30)$$

Onde:

$\rho_{eq}$  – Resistividade equivalente das n camadas;

$d_{eq}$  – Espessura equivalente das n camadas;

$n$  – Número de camadas reduzidas;

$\rho_i$  – Resistividade da i-ésima camada;

$d_i$  – Espessura da i-ésima camada.

## 2.10 Coeficiente de Penetração

O coeficiente de penetração, representado pela letra  $\alpha$ , “[...] indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento no solo equivalente[...]” (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995). Sua expressão é dada por:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} \quad (2.31)$$

Onde:

$r$  – Raio do anel equivalente do sistema de terra;

Vale ressaltar que, “cada sistema é transformado em um anel equivalente de Endrenyi, cujo raio “ $r$ ” é a metade da maior dimensão do aterramento” (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995). Considerando tais informações, para configurações diferentes de hastes alinhadas e igualmente espaçadas, considera-se a seguinte expressão para calcular o valor de  $r$ :

$$r = \frac{A}{D} \quad (2.32)$$

Onde:

$A$  – Área que compreende o sistema de aterramento;

$D$  – Maior dimensão do sistema de aterramento em uma direção.

## 2.11 Coeficiente de Divergência

Para solo em duas camadas, este coeficiente é definido pela relação entre a resistividade da última camada e a resistividade da primeira camada equivalente. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}} \quad (2.33)$$

## 2.12 Resistividade Aparente (Duas camadas)

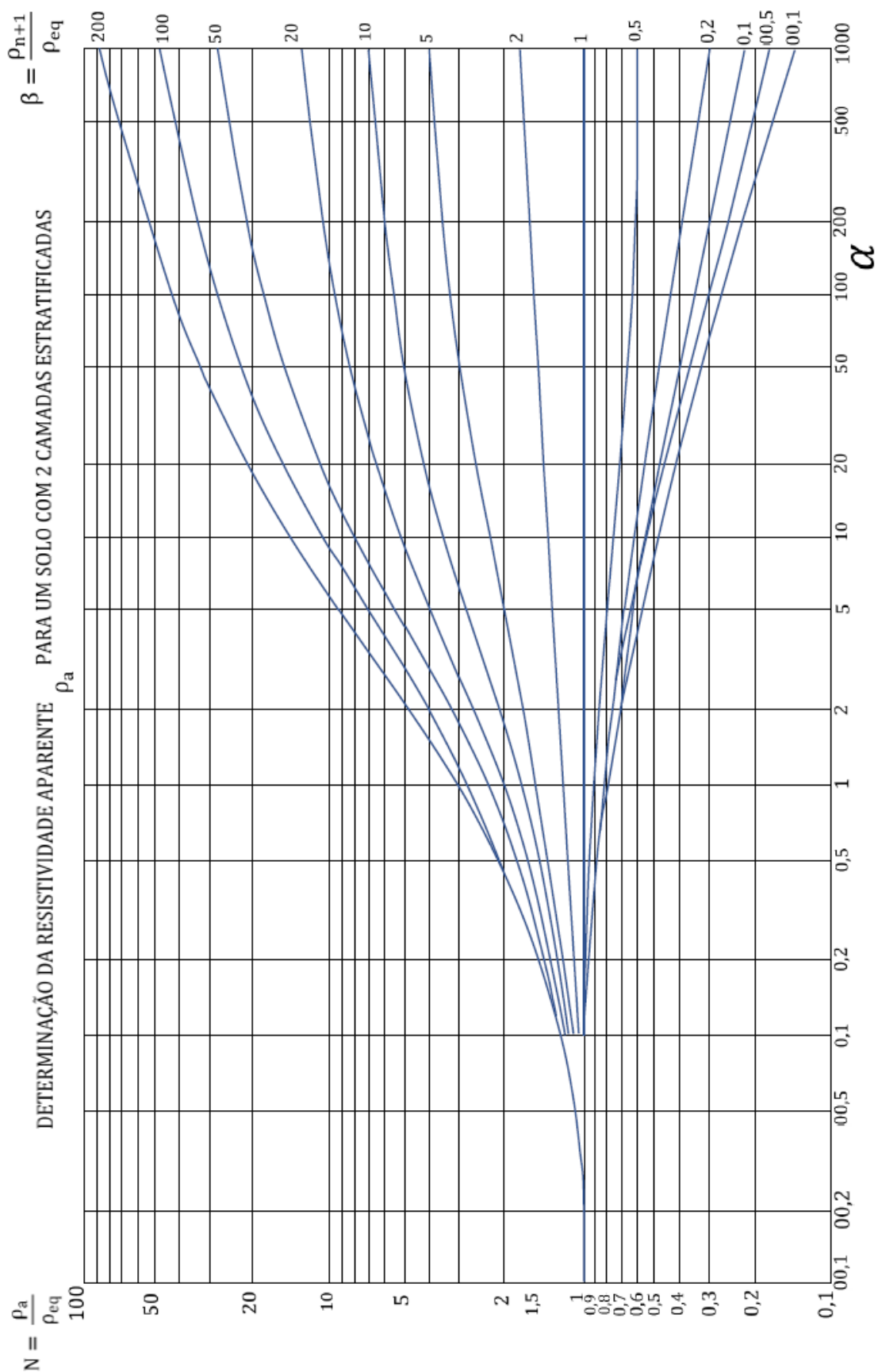
Com o ( $\alpha$ ) e ( $\beta$ ) obtidos, pode-se determinar a resistividade aparente ( $\rho_a$ ) do aterramento especificado e relação ao solo de duas camadas. Usando as curvas [...] desenvolvidas por Endrenyi [...], onde ( $\alpha$ ) é o eixo das abscissas e ( $\beta$ ) é a curva correspondente, obtém-se o valor de  $N$ . (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

A Equação 2.34 mostra como encontrar a resistividade aparente das duas camadas utilizando as curvas desenvolvidas por Endrenyi.

$$\rho_a = N \times \rho_{eq} \quad (2.34)$$

O Gráfico 2.2 apresenta as curvas de resistividade aparente utilizadas para determinar o valor de  $N$ .

Gráfico 2.2 – Curva de Resistividade Aparente



Fonte: gráfico adaptada de (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

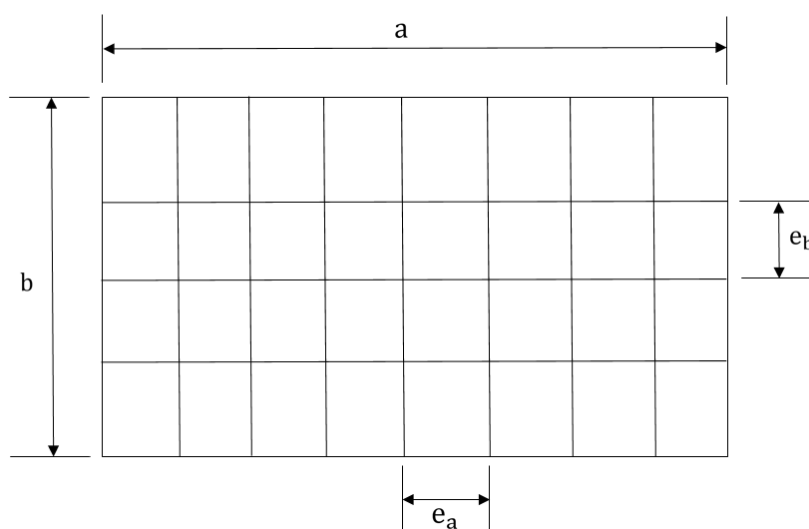
### 2.13 Dimensionamento da Malha de Aterramento

Para iniciar o dimensionamento da malha de aterramento, no primeiro momento, é necessário verificar o espaço disponível para instalar o sistema, determinando a área máxima que a malha poderá ocupar.

As dimensões da malha são pré-definidas. Assim, estabelecer um projeto inicial de malha é especificar um espaçamento entre os condutores e definir, se serão utilizadas, junto com a malha, hastes de aterramento. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

Sendo assim, faz necessário a projeção de uma malha inicial para verificar seu comportamento no solo estratificado, adaptando-a até que alcance os valores desejados para a resistência do sistema de aterramento. A Figura 2.24 ilustra um projeto inicial de malha.

**Figura 2.24** – Projeto Inicial de Malha



Fonte: (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Possuindo as dimensões da malha de aterramento, inclusive das dimensões das quadrículas, é possível calcular o número total de condutores. Por intermédio da resolução das Equações 2.35 e 2.36 é possível encontrar essa quantidade de condutores.

$$N_a = \frac{a}{e_a} + 1 \quad (2.35)$$



$$N_b = \frac{b}{e_b} + 1 \quad (2.36)$$

A dimensão total de todos os condutores se dará por meio da Equação 2.37:

$$L_{cabo} = aN_b + bN_a \quad (2.37)$$

Onde:

$L_{cabo}$  – Comprimento total de condutores na malha.

Se durante o dimensionamento forem introduzidas hastes na malha, deve-se acrescentar seus comprimentos na determinação do comprimento total de condutores na malha [...] (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

A Equação 2.38 mostra como encontrar a extensão total da malha de aterramento.

$$L_{total} = L_{cabo} + L_{hastes} \quad (2.38)$$

Onde:

$L_{hastes}$  – Comprimento total das hastes na malha.

## 2.14 Resistência de Aterramento da Malha

A resistência de aterramento da malha pode, aproximadamente, ser calculada pela fórmula de Sverak [...] Esta fórmula leva em conta a profundidade ( $h$ ) em que a malha é construída. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

A fórmula de Sverak está representada pela Equação 2.39.

$$R_{malha} = pa \left[ \frac{1}{L_{total}} + \frac{1}{\sqrt{20A_{malha}}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A_{malha}}}} \right) \right] \frac{A}{l} \quad (2.39)$$

Onde:

$A_{malha}$  – Área ocupada pela malha;

$h$  – Profundidade da malha de aterramento no solo.

Esta resistência da malha, representa a resistência elétrica da malha até o infinito. Seu valor deverá ser menor do que a máxima resistência limite da sensibilidade do relé de neutro. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

### 3. DESENVOLVIMENTO

O Capítulo 3 deste trabalho de conclusão de curso está voltado para a utilização de metodologia para reduzir a resistência de um solo por intermédio de um Sistema de Aterramento Elétrico, um estudo de caso. Serão apresentadas todas as informações relativas ao projeto, desde o solo escolhido, o método de medição, até os cálculos que definirão como si dará a configuração do sistema.

#### 3.1 Estudo de Caso

Inicialmente, para a escolha do local a ser estudado, foram levados diversos fatores em consideração. O primeiro foi a procura por um terreno livre de construção civil, com a finalidade de tornar as medições viáveis e livres de interferências causadas por fundações de edifícios.

Como segundo fator para a escolha do local, buscou-se por uma área grande o suficiente para que permitisse a realização das medições da resistividade do solo. Tendo em vista que quanto maior for o número de medições em um mesmo ponto, partindo dos espaçamentos 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 metros entre os eletrodos, mais preciso tonara-se o modelo estratificado do solo.

O terceiro parâmetro constituiu-se em encontrar o lugar mais próximo possível do Centro Universitário de Brasília. Isso pelo fato de facilitar a logística para a realização das medições.

Por conseguinte, foi constatado que o Setor de Grandes Áreas Norte, localizado na Asa Norte, Brasília – DF, possui uma área bastante extensa e livre de construções civis, compreendendo todas as três características necessárias para a escolha do estudo de caso. Vejamos a Figura 3.1 que mostra a fotografia da área do estudo de caso, contendo suas dimensões.

**Figura 3.1** – Fotografia Via Satélite do Local do Estudo de Caso



Fonte: figura adaptada de (Setor de Grandes Áreas Norte, 2018).

### 3.2 Medição da Resistência do Solo

Para a realização da medição da resistência do solo, foi empregado o método de Wenner, onde consiste na utilização de quatro eletrodos enterrados no solo: duas hastes para aplicar uma corrente elétrica no solo e as outras duas para captar a queda de tensão ocasionada pela corrente, para obter o valor de resistência. A Figura 3.2 mostra os quatro eletrodos cravados no solo:

**Figura 3.2** – Realização das medições no St. de Grandes Áreas Norte



Fonte: autoria própria.

Para fins de obtenção dos valores da resistência do solo, é necessário o emprego de instrumentação específica para tal. Conforme foi introduzido no Capítulo 1, para a realização das medições da resistência do solo, foi utilizado um terrômetro digital da marca MEGABRAZ, que é capaz de injetar corrente no solo, medir a queda de tensão, calcular o valor da resistência e retornar em um display digital este valor.

### 3.2.1 *Terrômetro digital MEGABRAZ*

O terrômetro digital MTD-20KWe mede resistências de aterramento e resistividade do terreno pelo método de Wenner, além das tensões espúrias provocadas pelas correntes parasitas no solo. (Terrômetro Digital, 2017)

As principais aplicações deste equipamento são a verificação da resistência de aterramento de prédios, instalações industriais, hospitalares e domiciliares, para-raios, antenas, subestações, etc. A medição da resistividade permite avaliar a estratificação do terreno para otimizar a engenharia dos sistemas de aterramento mais complexos. (Terrômetro Digital, 2017)

**Aplicação:** Medição de resistências de aterramento (com 3 bornes), resistividade do solo pelo método de Wenner (com 4 bornes) e tensões presentes no terreno. (Terrômetro Digital, 2017)

**Método de medição de resistência:** O terrômetro injeta no terreno uma corrente estabilizada eletronicamente, e mede com alta precisão a tensão que aparece no terreno pela circulação dessa corrente através da resistência de difusão do aterramento. A leitura de R é direta, no display. (Terrômetro Digital, 2017)

**Exatidão:** Medição de resistências:  $\pm 2\%$  do valor medido  $\pm 1\%$  do fundo de escala. Medição de tensão:  $\pm 2\%$  do valor medido  $\pm 1\%$  do fundo de escala. (Terrômetro Digital, 2017)

A Figura 3.3 mostra o terrômetro e todos seus acessórios necessários para a realização das medições, como eletrodos, conectores, marreta, trena e entre outros.

**Figura 3.3 – Terrômetro Digital MEGABRAZ e Acessórios**



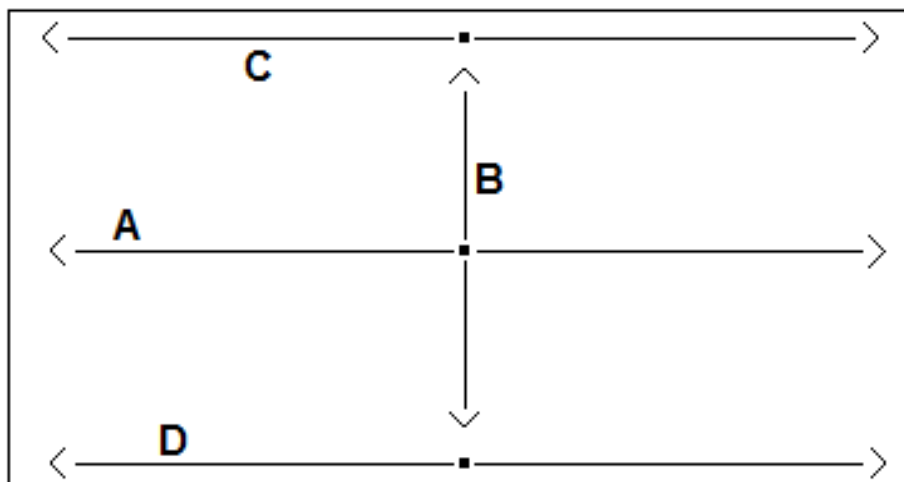
Fonte: (Terrômetro Digital, 2017).

### *3.2.2 Direções a serem medidas*

Conforme estabelecido no referencial teórico, as direções das medições devem ser distribuídas ao longo de toda a área do local do estudo de caso e é necessário, sempre que possível, estabelecer vários pontos de medição. Considerando tais aspectos referenciais, foram estabelecidos as direções e os pontos de medição.

A Figura 3.4 ilustra como ficou a distribuição das medições ao longo de toda a área do estudo de caso.

**Figura 3.4** – Pontos e Direções das Medições



Fonte: autoria própria.

### 3.2.3 Definição do espaçamento entre os eletrodos e profundidade

Seguindo o que estabelece o referencial teórico, a sequência de espaçamento mais indicado para medições da resistência do solo é a de 1, 2, 4, 8, 16 e 64 metros, no entanto para este estudo foi possível a realização de espaçamentos de até 16 metros. Isto devido a limitação da área do terreno do estudo de caso.

Sendo assim, os espaçamentos utilizados entre os eletrodos durante as medições foram os de 1, 2, 4, 8 e 16 metros.

Com relação a profundidade em que os eletrodos do terrômetro foram cravados no solo, foi utilizado o valor de 30 cm, o suficiente para garantir o contato entre ambos.

### 3.2.4 Resultados de medição

Aplicando o método de Wenner por intermédio do terrômetro digital MEGABRAS, no dia 12 de maio de 2018, às 9:00h, foi realizada as medições conforme o planejado, seguindo os critérios estabelecidos no item 3.2 deste Capítulo.

Realizadas todas as medições, foram obtidos os valores para a resistência do solo, conforme mostra o Quadro 3.1:

**Quadro 3.1** – Resultado das Medições da Resistência do Solo

Espaçamento (m)	A	B	C	D
1	208 $\Omega$	128,4 $\Omega$	130 $\Omega$	221 $\Omega$
2	89 $\Omega$	57,5 $\Omega$	82,4 $\Omega$	111 $\Omega$
4	40,1 $\Omega$	39,2 $\Omega$	43 $\Omega$	61,5 $\Omega$
8	24,4 $\Omega$	27,6 $\Omega$	25,1 $\Omega$	32,2 $\Omega$
16	18 $\Omega$	15,5 $\Omega$	15,1 $\Omega$	19 $\Omega$

Fonte: autoria própria.

Onde:

**A, B, C e D** – Eixos de medição.

Afim de demonstrar o funcionamento do terrômetro, a Figura 3.5 mostra uma das medições realizadas ao longo da série de medições.

**Figura 3.5** – Medição do Eixo A Espaçamento 8 m

Fonte: autoria própria.

### 3.3 Cálculo da Resistividade do Solo

De posse dos valores da resistência do solo, foi possível realizar o cálculo da resistividade do solo, utilizando primeiramente a Equação 2.8, conforme segue memorial:

$$K = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}}$$

Primeiramente foi calculado o valor de  $K$  para cada espaçamento entre os eletrodos (1, 2, 4, 8 e 16) com a profundidade de 0,30 metros, gerando os resultados do Quadro 3.2:

**Quadro 3.2** – Valores Calculados de  $K$  para cada Espaçamento

<b>Espaçamento (m)</b>	<b>Valor de <math>K</math> calculado</b>
1	7,1515
2	13,0443
4	25,3780
8	50,3889
16	100,5928

Fonte: autoria própria.

Calculados os valores de  $K$ , aplica-se a Equação 2.7 para cada valor de resistência de solo medida, encontrando o valor da resistividade do solo. O Quadro 3.3 apresenta os valores obtidos.



**Quadro 3.3 – Resistividade do Solo**

Espaçamento (m)	Resistividade do Solo ( $\rho$ )			
	A	B	C	D
1	1487,51 $\Omega$ .m	918,25 $\Omega$ .m	929,69 $\Omega$ .m	1580,48 $\Omega$ .m
2	1160,94 $\Omega$ .m	750,05 $\Omega$ .m	1074,85 $\Omega$ .m	1447,91 $\Omega$ .m
4	1017,66 $\Omega$ .m	994,82 $\Omega$ .m	1091,25 $\Omega$ .m	1560,75 $\Omega$ .m
8	1229,49 $\Omega$ .m	1390,73 $\Omega$ .m	1264,76 $\Omega$ .m	1622,52 $\Omega$ .m
16	1810,67 $\Omega$ .m	1559,19 $\Omega$ .m	1518,95 $\Omega$ .m	1911,26 $\Omega$ .m

Fonte: autoria própria.

Feitos os cálculos dos valores da Resistividade do Solo, foi necessário realizar uma análise dos resultados, para julgá-los válidos ou não. Utilizando os conceitos teóricos a respeito das análises das medidas, pôde-se realizar tal verificação, constatando que não houve nenhuma necessidade de desconsiderar alguma medida, utilizando um desvio de  $\geq 50\%$  em relação à média de ( $\rho$ ) para cada espaçamento. Os Quadros 3.4 e 3.5 mostram esta análise.

**Quadro 3.4 – Média dos Valores de Resistividade do Solo**

Espaçamento (m)	Média dos valores de Resistividade do Solo
1	1228,99 $\Omega$ .m
2	1108,44 $\Omega$ .m
4	1166,12 $\Omega$ .m
8	1376,87 $\Omega$ .m
16	1700,02 $\Omega$ .m

Fonte: autoria própria.

**Quadro 3.5 – Análise dos Desvios Relativos**

Espaçamento (m)	Desvios Relativos para cada Resistividade do Solo Medida			
	A	B	C	D
1	21,09%	25,28%	24,35%	28,60%
2	4,74%	32,33%	3,03%	30,63%
4	12,73%	14,69%	6,42%	33,84%
8	10,7%	1%	8,14%	17,84%
16	6,51%	8,28%	10,65%	12,43%

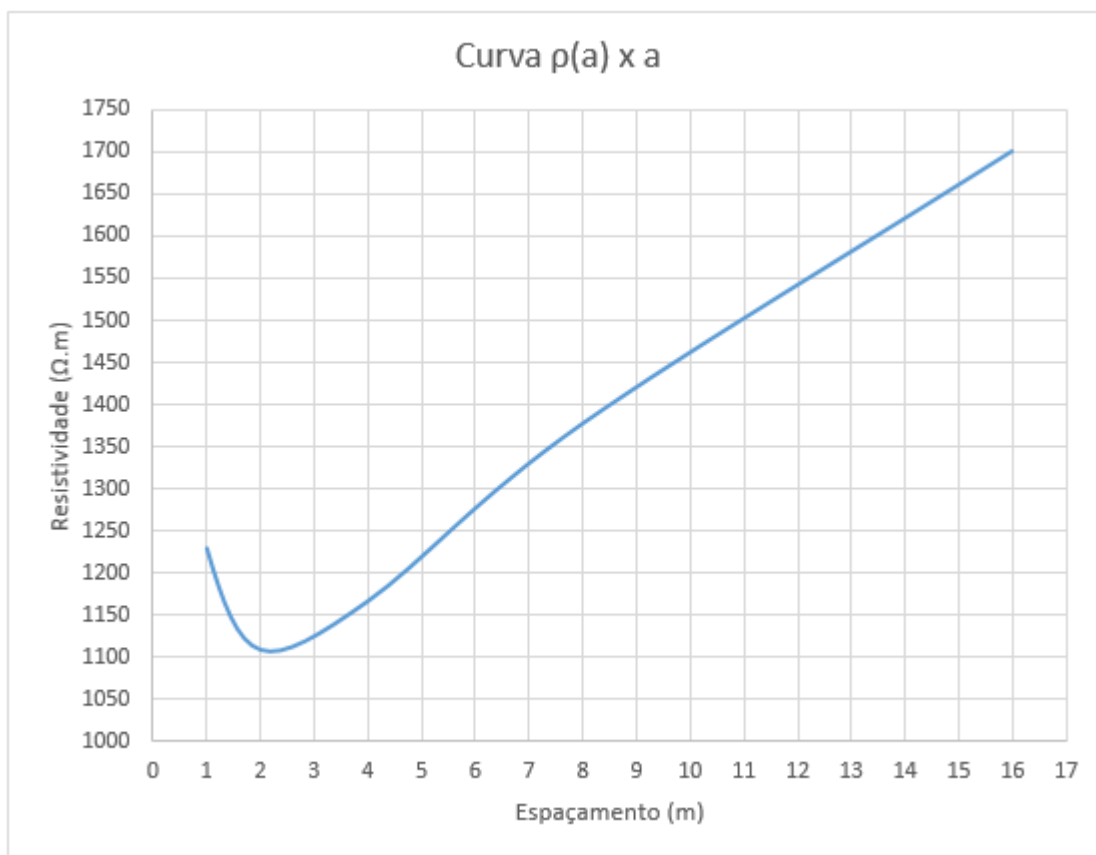
Fonte: autoria própria.

Como pode-se observar, não houve nenhuma medição que necessitou ser eliminada, considerando um desvio de  $\geq 50\%$ . Sendo assim, os valores do Quadro 3.4 são válidos para utilizar na estratificação do solo.

### 3.4 Estratificação do solo

No Capítulo 2 foram apresentados diversos métodos para realizar a estratificação do solo, desde aplicações para solos em duas camadas até solos em várias camadas. Para este estudo de caso, visando uma maior precisão na modelagem do solo, optou-se por realizar a estratificação em várias camadas, empregando o método de Pirson, conforme segue.

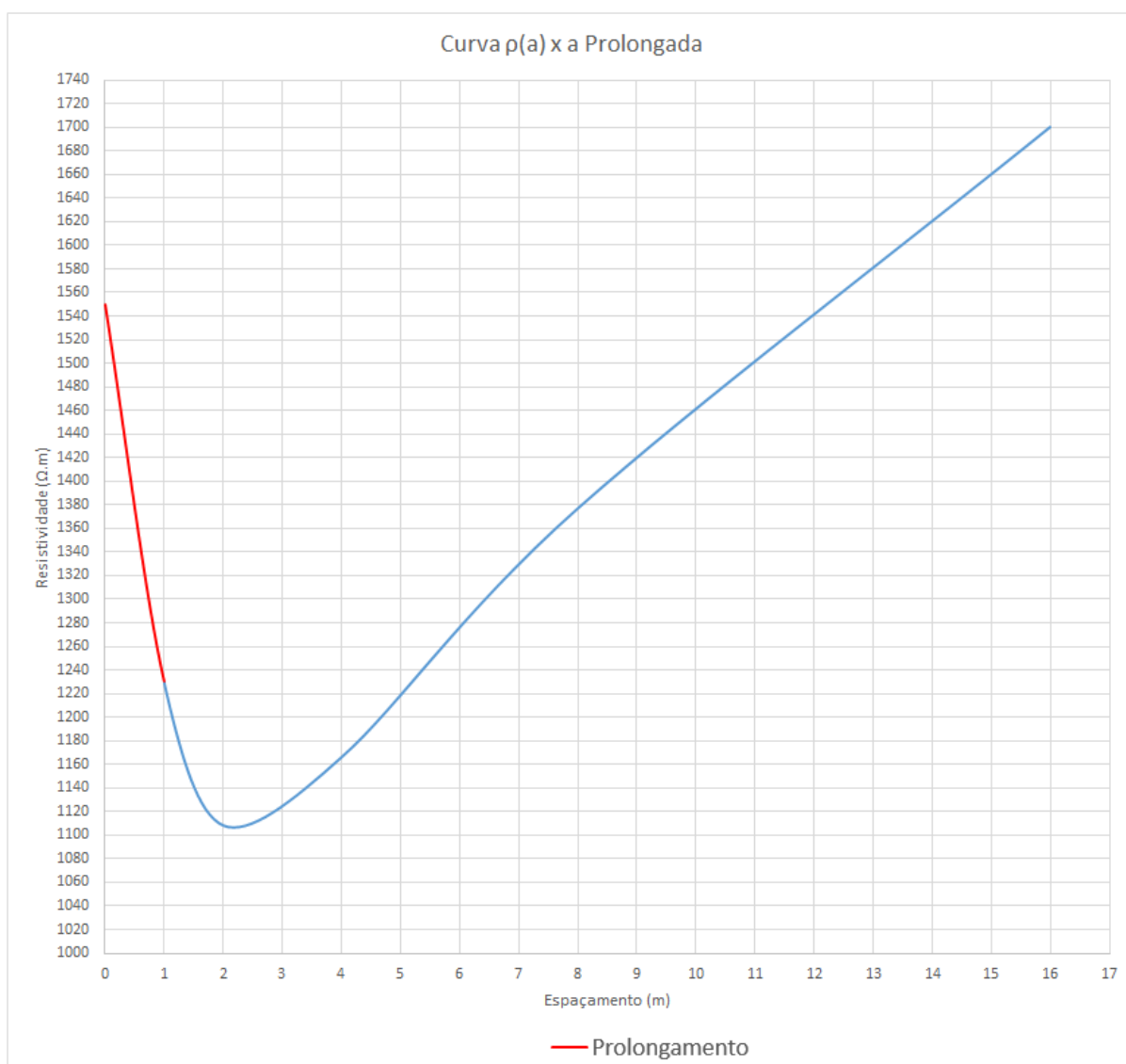
A primeira etapa para executar a estratificação do solo é esboçar a curva  $\rho(a) \times a$ . O Gráfico 3.1 mostra a supracitada.

**Gráfico 3.1 – Curva  $\rho(a) \times a$** 

Fonte: autoria própria.

A segunda etapa foi a realização do prolongamento da curva  $\rho(a) \times a$  até que corte o eixo das ordenadas do gráfico, para encontrar o valor de  $\rho_1$ . Podemos verificar o prolongamento no Gráfico 3.2.

**Gráfico 3.2 – Prolongamento da Curva  $\rho(a) \times a$ .**

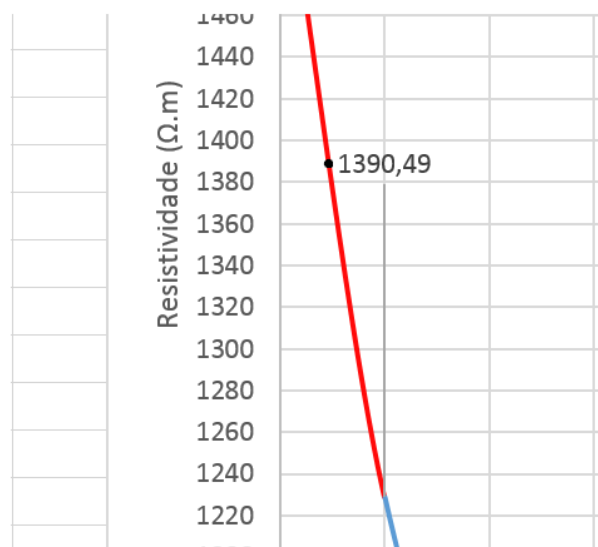


Fonte: autoria própria.

Como é possível observar, o valor da primeira camada ( $\rho_1$ ) é de 1550  $\Omega.m$  com base no prolongamento da curva até o eixo das ordenadas.

A próxima etapa foi a de escolher um valor de espaçamento ( $a_1$ ) arbitrariamente, e levado na curva  $\rho(a) \times a$  para encontrar o valor correspondente de  $\rho(a_1)$ . Assumiu-se então, 0,5 metro para  $a_1$  encontrando 1390,49  $\Omega.m$  para  $\rho(a_1)$ , conforme mostra a Figura 3.6.

**Figura 3.6** – Extrato da Curva  $\rho(a) \times a$



Fonte: autoria própria.

Com os valores de  $\rho(a_1)$  e  $\rho_1$  conhecidos, e sabendo que no ponto  $a_1 = 0,5 \text{ m}$  a curva é descendente, considerou-se que o  $\mathbf{K}$  é negativo e foi realizado o cálculo de  $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1}$ , obtendo o seguinte valor:

$$\frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = \frac{1390,49 \text{ } \Omega \cdot \text{m}}{1550 \text{ } \Omega \cdot \text{m}} = 0,897$$

Obtido o valor de  $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1}$  em  $a_1 = 0,5 \text{ m}$ , sabendo que  $\mathbf{K}$  é negativo, iniciou-se a leitura dos valores de  $\frac{h}{a}$  e  $\mathbf{K}$  utilizando a família de curvas teóricas da Figura 2.19, gerando os dados do Quadro 3.6:

**Quadro 3.6** – Valores para  $a_1 = 0,5 m$ 

$a_1 = 0,5 m$		$\frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = 0,897$
$K$	$\frac{h}{a}$	$h [m]$
-0,1	0,51	0,255
-0,2	0,843	0,4215
-0,3	1,056	0,528
-0,4	1,223	0,611
-0,5	1,33	0,665
-0,6	1,44	0,72
-0,7	1,533	0,766
-0,8	1,616	0,808
-0,9	1,7	0,85
-1,0	1,776	0,888

Fonte: autoria própria.

Em seguida, foi escolhido um outro valor de espaçamento, agora para  $a_2$ , arbitrariamente. O valor foi de  $a_2 = 2 m$ , encontrando  $\rho(a_2) = 1108,44 \Omega.m.$  , considerando que o  $K$  é negativo, foi realizado o cálculo de  $\frac{\rho(a_2)}{\rho_2}$ , obtendo o seguinte valor:

$$\frac{\rho(a_2)}{\rho_2} = \frac{1108,44 \Omega.m}{1550 \Omega.m} = 0,715$$

Obtido o valor de  $\frac{\rho(a_2)}{\rho_2}$  em  $a_2 = 2 m$ , sabendo que  $K$  é negativo, foi realizada uma nova leitura dos valores de  $\frac{h}{a}$  e  $K$  utilizando a família de curvas teóricas da Figura 2.19, foi produzido o Quadro 3.7:

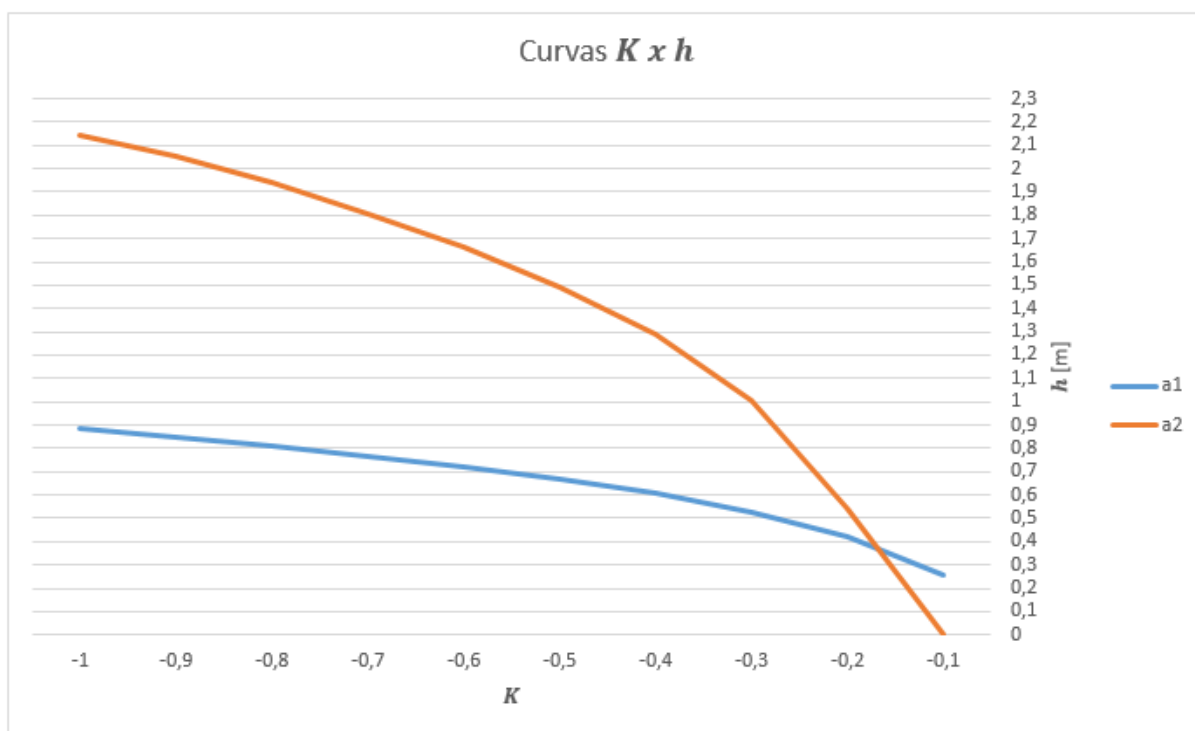
**Quadro 3.7** – Valores para  $a_2 = 2 m$ 

$a_2 = 2 m$		$\frac{\rho(a_2)}{\rho_1} = 0,715$
$K$	$\frac{h}{a}$	$h [m]$
-0,1	-	-
-0,2	0,27	0,54
-0,3	0,503	1,006
-0,4	0,646	1,292
-0,5	0,747	1,494
-0,6	0,833	1,666
-0,7	0,903	1,806
-0,8	0,969	1,938
-0,9	1,026	2,052
-1,0	1,071	2,1420

Fonte: autoria própria.

Com os valores de  $K$  e de  $h$ , traçou-se então as curvas  $K \times h$ , conforme mostra o Gráfico 3.3:

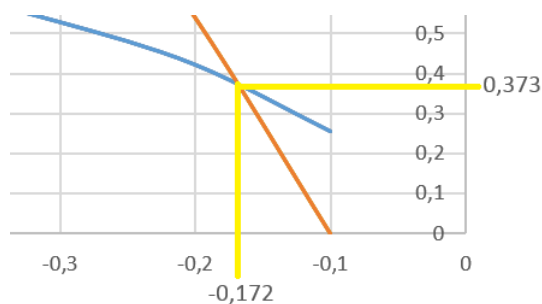
**Gráfico 3.3 – Curvas  $K \times h$ .**



Fonte: autoria própria.

Logo em seguida, foi possível encontrar a intersecção existente entre as duas curvas  $K \times h$ , encontrando os valores conforme a Figura 3.7:

**Figura 3.7 – Intersecção das Curvas  $K \times h$**



Fonte: autoria própria.

O valor de  $h = 0,373 \text{ m}$ , exposto acima, corresponde a profundidade da primeira camada, já para encontrar o valor da resistividade da segunda camada, foi utilizado o valor de  $K = -0,172$ , encontrado pela intersecção das curvas, e a Equação 2.14, conforme segue:

$$\rho_2 = 1095 \Omega \cdot \text{m}$$

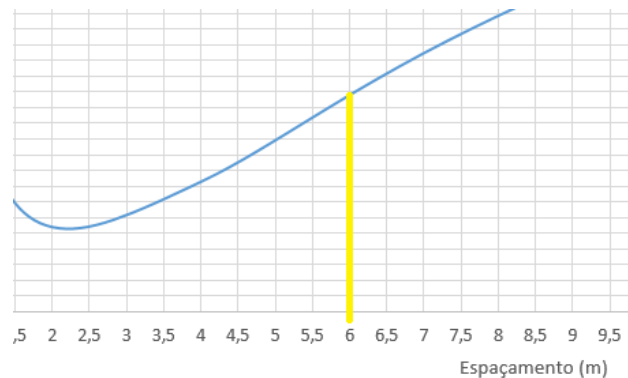
Até este ponto, foram encontrados os valores de  $\rho_1$ ,  $h_1$  e  $\rho_2$ , ou seja, já



possuímos um modelo de solo em duas camadas. No entanto, faz-se necessário a estratificação em mais camadas para que possamos alcançar um solo mais próximo de seu modelo real.

Para tal fim, foi necessário encontrar o valor de  $a_t$ , que é o ponto de transição da curva  $\rho(a) \times a$ , que muda o lado da concavidade. A Figura 3.8 indica exatamente o momento em que ocorre este fato, evidenciando  $a_t = 6 \text{ m}$ .

**Figura 3.8** – Ponto de Transição da Curva  $\rho(a) \times a$



Fonte: autoria própria.

Logo em seguida, utilizou-se o método de Lancaster-Jones para achar a resistividade equivalente vista pela terceira camada do solo. A Equação 2.18 foi empregada:

$$h_1 = d_1 = 0,373 \text{ m}$$

$$\hat{h}_2 = 0,373 \text{ m} + \hat{d}_2 = \frac{2}{3} 6 \text{ m}$$

$$\hat{h}_2 = 4 \text{ m}$$

$$\hat{d}_2 = 3,627 \text{ m}$$

Utilizou-se então, a Equação 2.19 de Hummel para calcular a resistividade média equivalente:

$$\hat{\rho}_2^1 = \frac{0,373 \text{ m} + 3,627 \text{ m}}{\frac{0,373 \text{ m}}{1550 \Omega \cdot \text{m}} + \frac{3,627 \text{ m}}{1095 \Omega \cdot \text{m}}}$$

$$\hat{\rho}_2^1 = 1125,817 \Omega \cdot \text{m}$$

Neste momento, com o valor de  $\hat{\rho}_2^1$  é possível iniciar o cálculo do segundo trecho da curva  $\rho(a) \times a$ , repetindo novamente o método utilizado para esboçar a

curva  $K \times h$ .

Assumindo que  $a_1 = 6 \text{ m}$ , obtém-se o valor de  $\rho(a_1) = 1275 \Omega \cdot \text{m}$  por meio da curva  $\rho(a) \times a$ , então calcula-se o valor de  $\frac{\rho_1}{\rho(a_1)}$ , considerando que no ponto  $a_1 = 6 \text{ m}$  a curva é ascendente, logo o  $K$  é positivo. Vale ressaltar que agora o valor de  $\rho_1 = \hat{\rho}_2^1$ .

$$\frac{\rho_1}{\rho(a_1)} = \frac{1125,817 \Omega \cdot \text{m}}{1275 \Omega \cdot \text{m}} = 0,883$$

Obtido o valor de  $\frac{\rho_1}{\rho(a_1)}$  em  $a_1 = 6 \text{ m}$ , sabendo que  $K$  é positivo, iniciou-se a leitura dos valores de  $\frac{h}{a}$  e  $K$  utilizando a família de curvas teóricas da Figura 2.20, retornando as informações do Quadro 3.8:

**Quadro 3.8** – Valores para  $a_1 = 6 \text{ m}$

$a_1 = 6 \text{ m}$		$\frac{\rho_1}{\rho(a_1)} = 0,883$
$K$	$\frac{h}{a}$	$h \text{ [m]}$
0,1	0,406	2,436
0,2	0,75	4,5
0,3	0,95	5,7
0,4	1,116	6,696
0,5	1,256	7,536
0,6	1,37	8,22
0,7	1,48	8,88
0,8	1,576	9,456
0,9	1,676	10,056
1,0	1,77	10,62

Fonte: autoria própria.

Em seguida, foi escolhido um outro valor de espaçamento, agora para  $a_2$ , arbitrariamente. O valor foi de  $a_2 = 9 \text{ m}$ , encontrando  $\rho(a_2) = 1420 \Omega \cdot \text{m}$ .

considerando que o  $K$  é positivo, foi realizado o cálculo de  $\frac{\rho_1}{\rho(a_2)}$ , obtendo o seguinte valor:

$$\frac{\rho_1}{\rho(a_2)} = \frac{1125,817 \Omega \cdot m}{1420 \Omega \cdot m} = 0,793$$

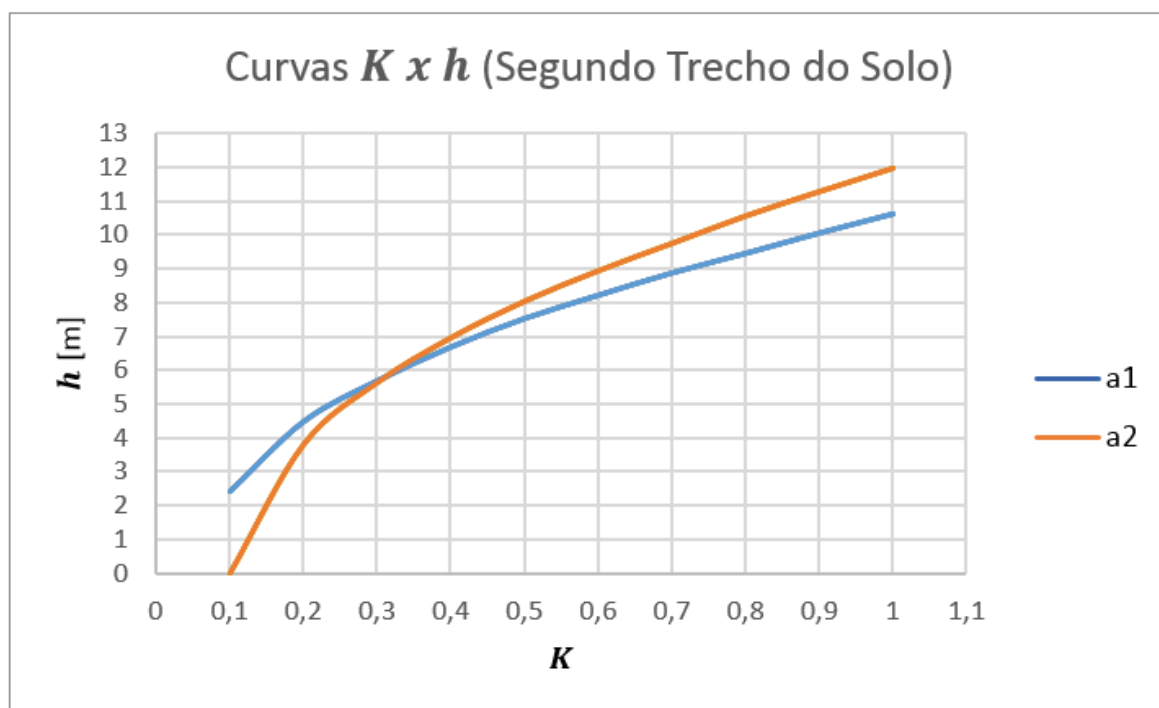
Obtido o valor de  $\frac{\rho_1}{\rho(a_2)}$  em  $a_2 = 2 \text{ m}$ , sabendo que  $K$  é positivo, iniciou-se a leitura dos valores de  $\frac{h}{a}$  e  $K$  utilizando a família de curvas teóricas da Figura 2.20, gerando os dados da Quadro 3.9:

**Quadro 3.9** – Valores para  $a_2 = 9 \text{ m}$

$a_2 = 9 \text{ m}$		$\frac{\rho_1}{\rho(a_2)} = 0,793$
$K$	$\frac{h}{a}$	$h \text{ [m]}$
0,1	-	-
0,2	0,423	3,807
0,3	0,626	5,634
0,4	0,773	6,957
0,5	0,893	8,037
0,6	0,993	8,937
0,7	1,083	9,747
0,8	1,173	10,557
0,9	1,253	11,277
1,0	1,33	11,97

Fonte: autoria própria.

Com os valores de  $K$  e de  $h$ , traçou-se então as curvas  $K \times h$ , conforme mostra o Gráfico 3.4:

**Gráfico 3.4** – Curvas  $K \times h$  (Segundo Trecho do Solo)

Fonte: autoria própria.

Logo em seguida, foi possível encontrar a intersecção existente entre as duas curvas  $K \times h$ ,  $K = 0,315$  e  $h = h_2 = 5,852 \text{ m}$ . Assim, usando a Equação 2.14 obtemos o valor de  $\rho_3$ :

$$\rho_3 = 2161,239 \Omega.m$$

Até aqui, foram encontrados os valores de  $\rho_1$ ,  $h_1$ ,  $\rho_2$ ,  $h_2$  e  $\rho_3$ , ou seja, já possuímos um modelo de solo em três camadas. Mas para alcançarmos um modelo mais próximo ainda do real, será modelada mais uma última camada.

Sendo assim, foi necessário encontrar um outro valor de  $a_t$  na curva  $\rho(a) \times a$ , obtendo  $a_t = 10 \text{ m}$ . Utilizando o método de Lancaster-Jones para encontrar a resistividade equivalente vista pela quarta camada do solo, temos:

$$h_2 = d_2 = 5,852 \text{ m}$$

$$\hat{h}_3 = 5,852 \text{ m} + \hat{d}_3 = \frac{2}{3} 10 \text{ m}$$

$$\hat{h}_3 = 6,666 \text{ m}$$

$$\hat{d}_3 = 0,814 \text{ m}$$

Utilizou-se então, a Equação 2.19 de Hummel para calcular a resistividade

média equivalente:

$$\hat{\rho}_3^2 = \frac{d_2 + \hat{d}_3}{\frac{d_2}{\hat{\rho}_2^1} + \frac{\hat{d}_3}{\rho_3}}$$

$$\hat{\rho}_3^2 = \frac{5,852 \text{ m} + 0,814 \text{ m}}{\frac{5,852 \text{ m}}{1125,817 \text{ } \Omega \cdot \text{m}} + \frac{0,814 \text{ m}}{2161,239 \text{ } \Omega \cdot \text{m}}}$$

$$\hat{\rho}_3^2 = 1195,772 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$$

Neste momento, com o valor de  $\hat{\rho}_3^2$  é possível iniciar o cálculo do terceiro trecho da curva  $\rho(a)$  x  $a$ , repetindo novamente o método utilizado para esboçar a curva  $K$  x  $h$ .

Assumindo que  $a_1 = 10 \text{ m}$ , obtém-se o valor de  $\rho(a_1) = 1464 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$  por meio da curva  $\rho(a)$  x  $a$ , então calcula-se o valor de  $\frac{\rho_1}{\rho(a_1)}$ , considerando que no ponto  $a_1 = 10 \text{ m}$  a curva é ascendente, logo o  $K$  é positivo. Vale ressaltar que agora o valor de  $\rho_1 = \hat{\rho}_3^2$ .

$$\frac{\rho_1}{\rho(a_1)} = \frac{1195,772 \text{ } \Omega \cdot \text{m}}{1464 \text{ } \Omega \cdot \text{m}} = 0,8168$$

Obtido o valor de  $\frac{\rho_1}{\rho(a_1)}$  em  $a_1 = 10 \text{ m}$ , sabendo que  $K$  é positivo, iniciou-se a leitura dos valores de  $\frac{h}{a}$  e  $K$  utilizando a família de curvas teóricas da Figura 2.20, obteve-se então os valores do Quadro 3.10:

**Quadro 3.10** – Valores para  $a_1 = 10\text{ m}$ 

$a_1 = 10\text{ m}$		$\frac{\rho_1}{\rho(a_1)} = 0,8168$
$K$	$\frac{h}{a}$	$h\text{ [m]}$
0,1	-	-
0,2	0,49	4,9
0,3	0,693	6,93
0,4	0,843	8,43
0,5	0,963	9,63
0,6	1,076	10,76
0,7	1,166	11,66
0,8	1,256	12,56
0,9	1,336	13,36
1,0	1,423	14,23

Fonte: autoria própria.

Em seguida, foi escolhido um outro valor de espaçamento, agora para  $a_2$ , arbitrariamente. O valor foi de  $a_2 = 16\text{ m}$ , encontrando  $\rho(a_2) = 1700,02\ \Omega.\text{m}$ . , considerando que o  $K$  é positivo, foi realizado o cálculo de  $\frac{\rho_1}{\rho(a_2)}$ , obtendo o seguinte valor:

$$\frac{\rho_1}{\rho(a_2)} = \frac{1195,772\ \Omega.\text{m}}{1700,02\ \Omega.\text{m}} = 0,703$$

Obtido o valor de  $\frac{\rho_1}{\rho(a_2)}$  em  $a_2 = 16\text{ m}$ , sabendo que  $K$  é positivo, iniciou-se a leitura dos valores de  $\frac{h}{a}$  e  $K$  utilizando a família de curvas teóricas da Figura 2.20, produzindo os dados do Quadro 3.11:

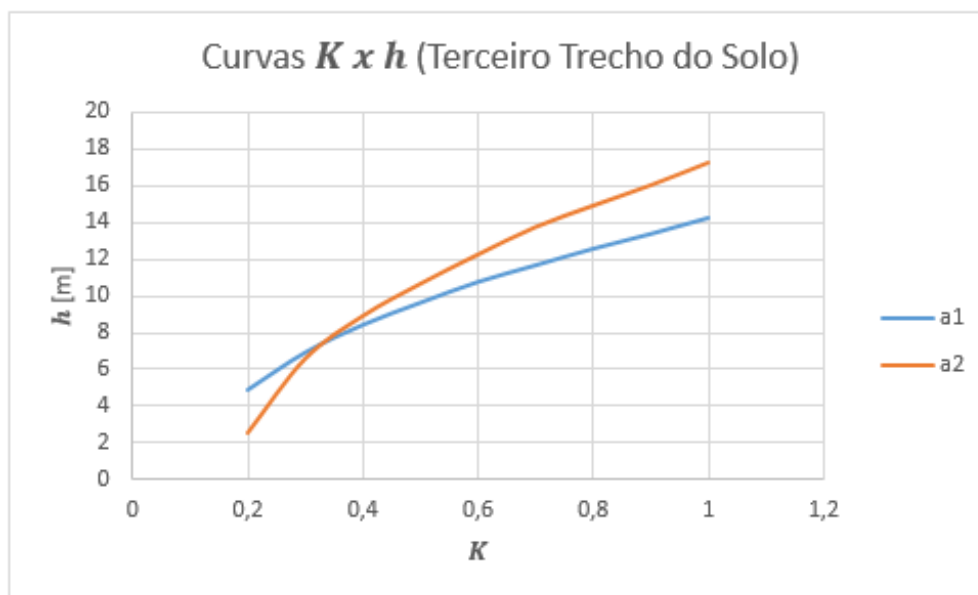
**Quadro 3.11** – Valores para  $a_2 = 16 m$ 

$a_2 = 16 m$		$\frac{\rho_1}{\rho(a_2)} = 0,703$
$K$	$\frac{h}{a}$	$h [m]$
0,1	-	-
0,2	0,156	2,496
0,3	0,41	6,56
0,4	0,556	8,896
0,5	0,666	10,656
0,6	0,766	12,256
0,7	0,86	13,76
0,8	0,933	14,928
0,9	1,003	16,048
1,0	1,08	17,28

Fonte: autoria própria.

Com os valores de  $K$  e de  $h$ , traçou-se então as curvas  $K \times h$ , conforme mostra o Gráfico 3.5:

**Gráfico 3.5** – Curvas  $K \times h$  (Terceiro Trecho do Solo)



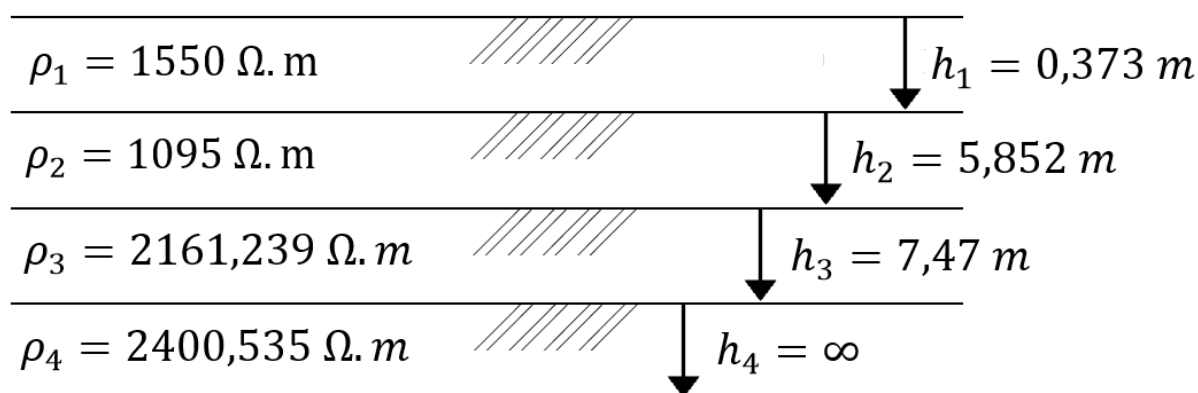
Fonte: autoria própria.

Logo em seguida, foi possível encontrar a intersecção existente entre as duas curvas  $K \times h$ ,  $K = 0,335$  e  $h = h_3 = 7,47$  m. Assim, usando a Equação 2.14 obtemos o valor de  $\rho_4$ :

$$\rho_4 = 2400,535 \Omega \cdot m$$

Com isso, conclui-se a estratificação do solo em quatro camadas. A Figura 3.9 ilustra as quatro camadas, seus valores de resistividade e suas respectivas profundidades.

**Figura 3.9** – Solo Estratificado



Fonte: autoria própria.



### 3.5 Cálculo da Resistividade Equivalente ( $\rho_{eq}$ )

Obtido o modelo estratificado do solo, para seguir com o projeto do aterramento, é necessário encontrar a Resistividade Equivalente ( $\rho_{eq}$ ) entre a primeira, segunda e terceira camada.

Para isso, foi utilizado a Equação 2.29 para a Resistividade Equivalente, e a Equação 2.30 para definir a profundidade desta camada equivalente. Ficando da seguinte forma:

$$\rho_{eq} = \frac{0,373 \text{ m} + 5,852 \text{ m} + 7,47 \text{ m}}{\frac{0,373 \text{ m}}{1550 \Omega \cdot \text{m}} + \frac{5,852 \text{ m}}{1095 \Omega \cdot \text{m}} + \frac{7,47 \text{ m}}{2161,239 \Omega \cdot \text{m}}}$$

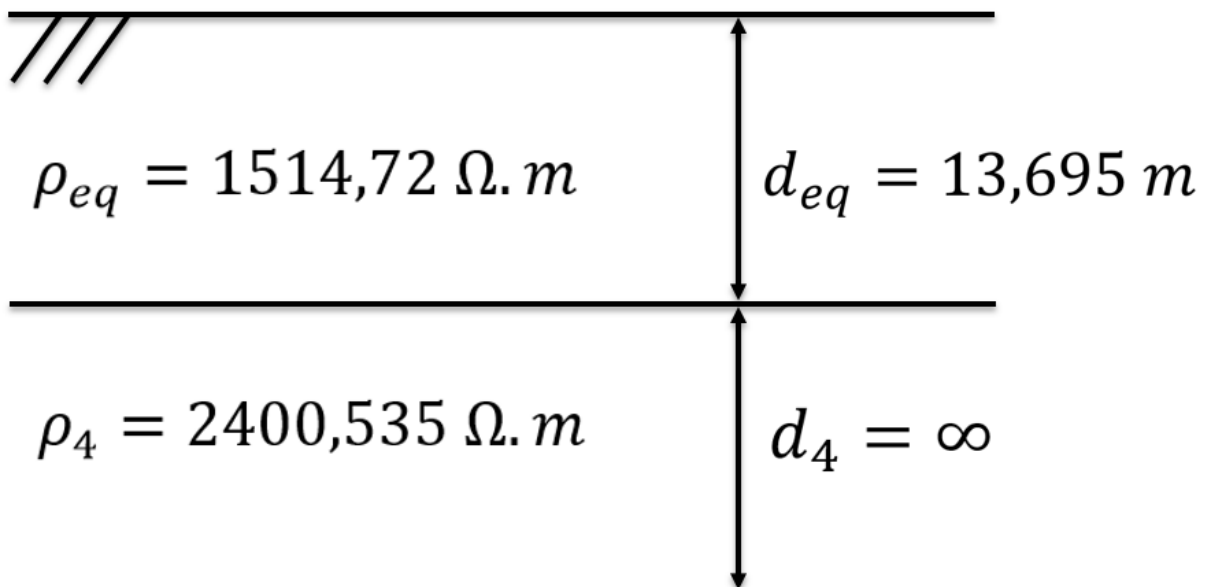
$$\rho_{eq} = 1514,72 \Omega \cdot \text{m}$$

$$d_{eq} = 0,373 \text{ m} + 5,852 \text{ m} + 7,47 \text{ m}$$

$$d_{eq} = 13,695 \text{ m}$$

A Figura 3.10 ilustra o solo reduzido em duas camadas.

**Figura 3.10** – Solo Reduzido em Duas Camadas



Fonte: autoria própria.

### 3.6 Cálculos dos Coeficientes de Penetração ( $\alpha$ ) e Divergência ( $\beta$ )

Objetivando encontrar o valor da Resistividade Aparente do solo, fez-se

necessário o cálculo dos Coeficientes de Penetração ( $\alpha$ ) e Divergência ( $\beta$ ), conforme referencial bibliográfico.  $\infty$

Primeiramente foi necessário estabelecer dimensões iniciais para o espaço que a malha de aterramento ocuparia. Estabeleceu-se então os valores máximos que ela poderia ter,  $100\text{ m} \times 68\text{ m}$ , encontrando o seguinte valor de área:

$$A = 100\text{ m} \times 68\text{ m}$$

$$A = 6800\text{ m}^2$$

A segunda etapa, foi a de determinar o tamanho maior que ela possui em uma direção. Neste caso, devido a malha ser retangular, sua diagonal é a maior dimensão. Fez-se então:

$$D = \sqrt{(100\text{ m})^2 + (68\text{ m})^2}$$

$$D = 120,93\text{ m}$$

Calculou-se então o raio do anel ( $r$ ) por meio da Equação 2.32:

$$r = \frac{6800\text{ m}^2}{120,93\text{ m}}$$

$$r = 56,231\text{ m}$$

Logo em seguida utilizou-se a Equação 2.31 afim de obter o valor do ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \frac{56,231\text{ m}}{13,695\text{ m}}$$

$$\alpha = 4,106$$

E por fim, usando a Equação 2.33, chegou-se ao valor do Coeficiente de Divergência:

$$\beta = \frac{2400,535\ \Omega \cdot \text{m}}{1514,72\ \Omega \cdot \text{m}}$$

$$\beta = 1,585$$

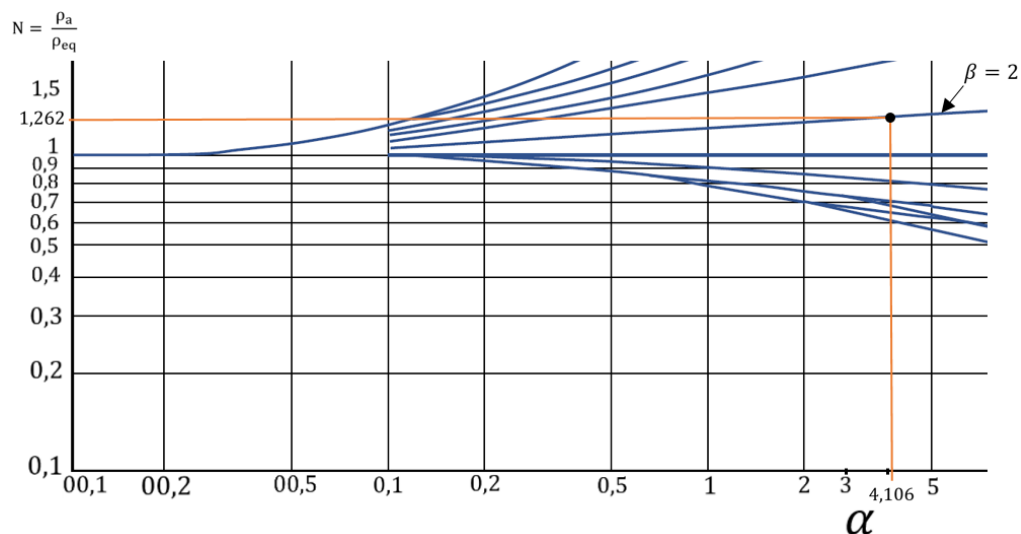
### 3.7 Obtenção da Resistividade Aparente ( $\rho\alpha$ )

De posse dos valores dos coeficientes ( $\alpha$ ) e ( $\beta$ ), e utilizando as curvas desenvolvidas por Endrenyi (Gráfico 2.2), foi possível obter o valor de ( $N$ ).

Para  $\beta = 1,585$ , a curva mais adequada para obter o valor de ( $N$ ) é a curva de  $\beta = 2$ , visto que é a curva mais próxima do valor calculado. De acordo com o Gráfico 2.2.

Determinada a curva mais adequada para a análise gráfica, foi possível determinar o valor de ( $N$ ), conforme a Figura 3.11.

**Figura 3.11** – Extrato das Curvas de Endrenyi



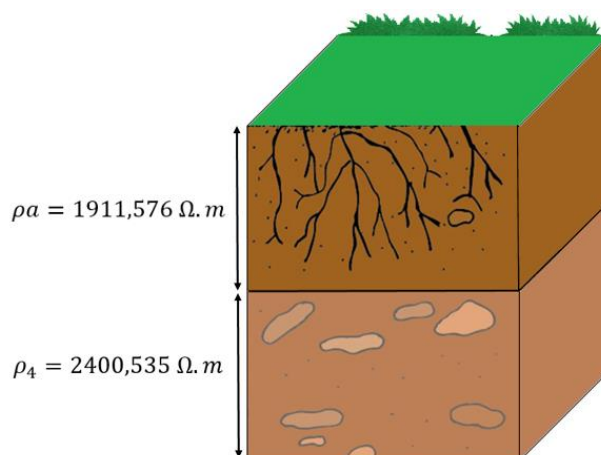
Fonte: figura adaptada de (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Obtido o valor de ( $N$ ), foi possível determinar o valor da Resistividade Aparente ( $\rho_a$ ), por intermédio da Equação 2.34:

$$\rho_a = 1,262 \times 1514,72 \Omega.m$$

$$\rho_a = 1911,576 \Omega.m$$

**Figura 3.12** – Redução da Estratificação do Solo em Duas Camadas



Fonte: autoria própria.

### 3.8 Definição do Tipo do Solo

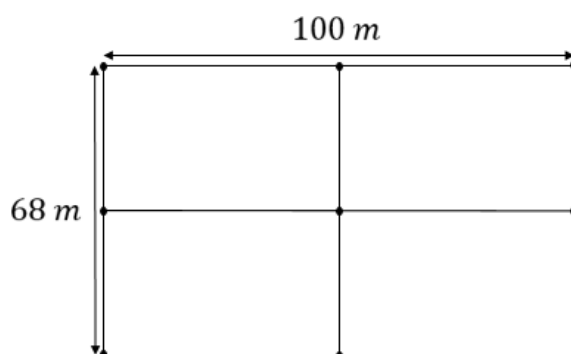
Com a obtenção do valor da resistividade aparente do solo, foi possível definir qual o tipo de solo do estudo de caso, basta realizar uma consulta ao Quadro 1.1 e verificar que seu tipo se enquadra como um calcário compacto, pois sua resistividade está entre 1.000  $\Omega.m$  e 5.000  $\Omega.m$ .

$$1000 \Omega.m \leq \rho_a \leq 5000 \Omega.m$$

### 3.9 Dimensionamento Inicial da Malha

Para uma primeira análise do comportamento do sistema de aterramento no solo, foi necessário realizar um dimensionamento inicial da malha de aterramento. Admitiu-se então uma configuração contendo cabos condutores e hastes em todos os nós, ficando conforme a Figura 3.13.

**Figura 3.13** – Malha de Aterramento 1



Fonte: autoria própria.

Para compreender a Figura 3.13, deve-se considerar que as linhas são os cabos condutores e os pontos pretos são as hastes, todos igualmente distribuídos ao longo da área.

Posteriormente, determinou-se a quantidade de cabos condutores por meio das Equações 2.35 e 2.36.

$$a = 100 m$$

$$e_a = \frac{100 m}{2} = 50m$$

$$b = 68 m$$

$$e_b = \frac{68 \text{ m}}{2} = 34 \text{ m}$$

$$N_a = \frac{100 \text{ m}}{50 \text{ m}} + 1 = 3$$

$$N_b = \frac{68 \text{ m}}{34 \text{ m}} + 1 = 3$$

Em seguida, fazendo uso da Equação 2.37, encontrou-se o comprimento de cabos condutores para a malha.

$$L_{cabo} = (100 \text{ m} \times 3) + (68 \text{ m} \times 3)$$

$$L_{cabo} = 504 \text{ m}$$

Para encontrar a quantidade de hastes basta fazer o produto entre  $N_a$  e  $N_b$ , chegando a nove hastes na malha.

Outro valor pré-definido pelo projetista do sistema de aterramento, é o comprimento das hastes. Para este parâmetro escolheu-se arbitrariamente o valor de  $3 \text{ m}$  para todas as hastes. Assim, foi exequível encontrar o valor de  $L_{hastes}$ :

$$L_{hastes} = 3 \text{ m} \times 9$$

$$L_{hastes} = 27 \text{ m}$$

Deste modo, operando a Equação 2.38, estabeleceu-se o comprimento total da malha.

$$L_{total} = 504 \text{ m} + 27 \text{ m}$$

$$L_{total} = 531 \text{ m}$$

### 3.10 Profundidade da Malha ( $h$ )

A profundidade ( $h$ ) adotada para a malha de aterramento foi a de  $0,5 \text{ m}$ , pois este valor já é o suficiente para garantir que os condutores da malha mantenham contato com o solo em sua total vastidão.

### 3.11 Resistência de Aterramento ( $R_{malha}$ )

Conhecendo os valores dos quatro parâmetros, ( $\rho a$ ), ( $h$ ), ( $L_{total}$ ) e ( $A_{malha}$ ), foi possível encontrar o valor de  $R_{malha}$ , empregando a Equação 2.39.

$$R_{malha} = 1911,576 \Omega \cdot m \left[ \frac{1}{531 m} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 6800 m^2}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0,5 m \sqrt{\frac{20}{6800 m^2}}} \right) \right]$$

$$R_{malha} = 13,83 \Omega$$

Neste instante, foi necessário realizar um comparativo entre o valor de resistência de projeto, que para este estudo de caso é da ordem de  $10 \Omega$ , e o valor de ( $R_{malha}$ ) calculado. Constatou-se então que ainda não está adequado com o objetivo.

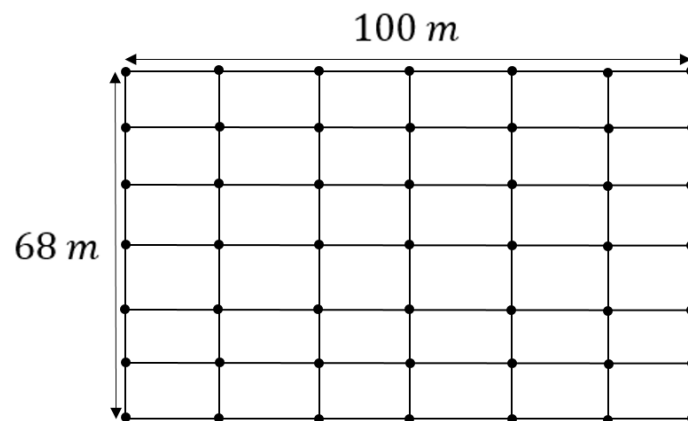
Com isto, fez-se necessário o dimensionamento de outra malha de aterramento, de modo que obtenhamos o valor da resistência de projeto.

### 3.12 Dimensionamento da Malha 2 e sua Resistência

Desta vez, foram adicionados mais cabos e hastes a malha inicial, de modo que o valor de ( $L_{total}$ ) torne-se maior que o inicial.

A configuração da malha 2 ficou conforme Figura 3.14.

**Figura 3.14** – Malha de Aterramento 2



Fonte: autoria própria.

Posteriormente, foram encontradas as quantidades de cabos condutores através das Equações 2.35 e 2.36.

$$a = 100 m$$

$$e_a = \frac{100 m}{6} = 16,666 m$$

$$b = 68 m$$

$$e_b = \frac{68 \text{ m}}{6} = 11,333 \text{ m}$$

$$N_a = \frac{100 \text{ m}}{16,666 \text{ m}} + 1 = 7$$

$$N_b = \frac{68 \text{ m}}{11,333 \text{ m}} + 1 = 7$$

Logo após, utilizando da Equação 2.37, encontrou-se o comprimento de cabos condutores para a malha.

$$L_{cabo} = (100 \text{ m} \times 7) + (68 \text{ m} \times 7)$$

$$L_{cabo} = 1176 \text{ m}$$

Outra etapa foi a de obter a quantidade de hastes e calcular seu comprimento total. A Equação 2.38 foi usada.

$$N_{hastes} = 49$$

$$L_{hastes} = 3 \text{ m} \times 49$$

$$L_{hastes} = 147 \text{ m}$$

Ficando o comprimento total da malha de 1323 m, depois de feita a soma entre ( $L_{cabo}$ ) e ( $L_{hastes}$ ).

Por fim, calcula-se o valor da Resistência de Aterramento da Malha 2:

$$R_{malha2} = 1911,576 \Omega \cdot m \left[ \frac{1}{1323 \text{ m}} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 6800 \text{ m}^2}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0,5 \text{ m} \sqrt{\frac{20}{6800 \text{ m}^2}}} \right) \right]$$

$$R_{malha2} = 11,67 \Omega$$

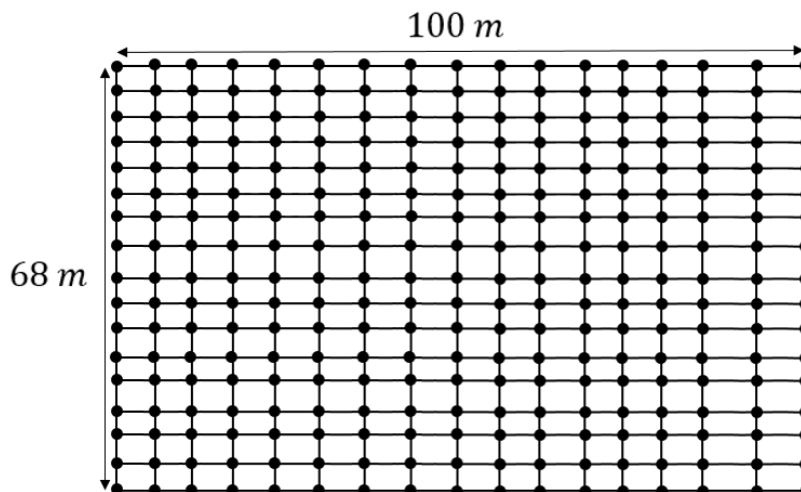
Apesar do valor da resistência está bem próxima do valor de projeto, foi realizado um terceiro dimensionamento para a malha, objetivando aumentar mais ainda a aproximação entre a resistência do aterramento e a resistência de projeto.

### 3.13 Dimensionamento da Malha 3 e sua Resistência

Conforme mostrou o resultado de ( $R_{malha2}$ ), o aumento do comprimento total da malha reduz o valor da resistência do aterramento. Seguindo este

entendimento, o terceiro dimensionamento possui mais cabos e hastes que o segunda, conforme a Figura 3.15.

**Figura 3.15** – Malha de Aterramento 3



Fonte: autoria própria.

Realizando os cálculos de forma análoga ao da Malha 2, com as dimensões da Malha 3, obtêm-se os seguintes resultados:

$$L_{cabo} = 2856 \text{ m}$$

$$L_{hastes} = 867 \text{ m}$$

$$L_{total} = 3723 \text{ m}$$

Logo, o valor da resistência do aterramento é de:

$$R_{malha3} = 1911,576 \Omega \cdot m \left[ \frac{1}{3723 \text{ m}} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 6800 \text{ m}^2}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0,5 \text{ m} \sqrt{\frac{20}{6800 \text{ m}^2}}} \right) \right]$$

$$R_{malha3} = 10,74 \Omega$$

Com o valor de  $R_{malha3}$  encontrado, pôde ser verificado que o dimensionamento da Malha 3 ficou adequado, visto que seu valor de resistência está bem próximo ao de projeto.

### 3.14 Simulação via Software

Após todo o cálculo manual da estratificação do solo e o dimensionamento



adequado da malha de aterramento, foi realizado o mesmo procedimento em um *software* desenvolvido para esta finalidade, o TecAt Plus 6.3.

### 3.13.1 TecAt Plus 6.3

O *software* TecAt Plus 6.3 é uma solução voltada para a área de aterramentos elétricos, que proporciona aos seus usuários, ferramentas automatizadas para realizar cálculos do projeto.

Com as medições realizadas em campo, seja pelo método de Wenner ou de Schlumberger, o usuário pode inseri-las no *software* para iniciar o planejamento de seu projeto de aterramento. A partir daí já pode-se obter a resistividade do solo e realizar a estratificação do mesmo, podendo ser em 1, 2, 3 ou 4 camadas.

Além de fornecer o modelo estratificado do solo, o programa é capaz de calcular a resistência de qualquer tipo de malha, seja ela, complexa ou não, de qualquer tamanho em solo de várias camadas. Também é capaz de retornar os valores de potenciais de malha, da superfície, de toque e de passo.

O TecAt Plus 6.3 fornece todas essas informações e muitas outras, tudo através de relatórios descritivos, telas do *software*, tabelas, e gráficos 2-D e 3-D.

Sabendo das funcionalidades do *software*, foi iniciada a simulação, inserindo os dados de medições obtidos por meio do terrômetro digital. A Figura 3.16 mostra o *print screen* da tela em que foram colocados os valores.

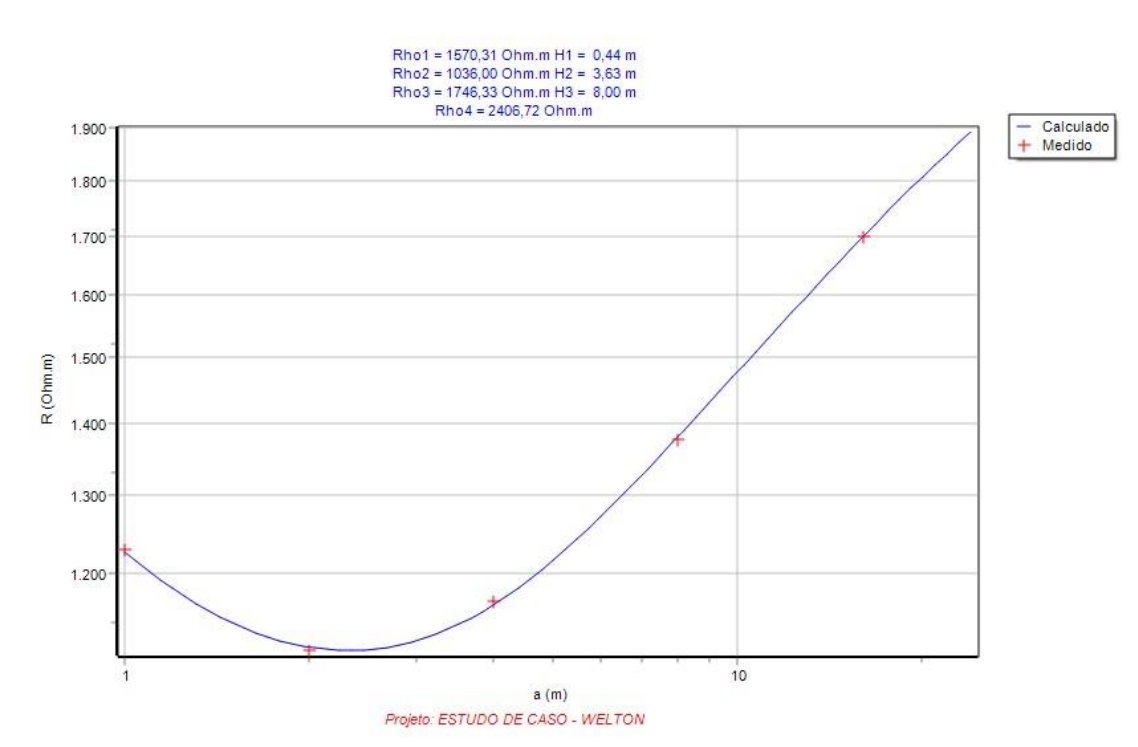
**Figura 3.16** – Print Screen da tela do TecAt - Medições

Fórmula:	completa	<input checked="" type="checkbox"/> eliminar se >	50	% fora da média						
Modelo:	Wenner	Profundidade (h)	0,3	m						
Dados em:		Resistência								
a	A	B	C	D	E	F	G	H	média	
[m]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	rm
1	208	128,4	130	221						1228,989
2	89	57,5	82,4	111						1108,442
4	40,1	39,2	43	61,5						1166,118
8	24,4	27,6	25,1	32,2						1376,876
▶ 16	18	15,5	15,1	19						1700,017

Fonte: (Tecat Plus 6.3, 2018).

Após inserir os dados, foi possível realizar a estratificação do solo, optando por 4 camadas, visando o alto grau de precisão da modelagem do solo e o comparativo com o calculado manualmente. Com isso, o programa retornou o Gráfico 3.6 e o relatório descritivo da estratificação, representado pelas Figuras 3.17 e 3.18.

**Gráfico 3.6** – Resistividade do Solo Estratificado



Fonte: (Tecat Plus 6.3, 2018).

**Figura 3.17 – Extrato 1 do Relatório Descritivo da Resistividade**

**Relatório:**

Dados do Projeto:

Projeto: ESTUDO DE CASO - WELTON

Cliente:

Data: 15/05/2018

Local: PROXIMIDADES DO UNICEUB

Configuração:

Modelo: Wenner

Fórmula: Completa

Prof. med.: 0,3

Exclusão %:50

Esp. mín.: 0,55

Aparelho: Terrômetro Digital MEGABRAS

Medições:

espaçamento [m]	linhas de medição:							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1,00	208,00	128,40	130,00	221,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	89,00	57,50	82,40	111,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,00	40,10	39,20	43,00	61,50	0,00	0,00	0,00	0,00
8,00	24,40	27,60	25,10	32,20	0,00	0,00	0,00	0,00
16,00	18,00	15,50	15,10	19,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: (Tecat Plus 6.3, 2018).

**Figura 3.18** – Extrato 2 do Relatório Descritivo da Resistividade

```

Resultado:
Nº de camadas: 4
  camada #1: 1570,31 [Ohm.m] x 0,44 [m]
  camada #2: 1036 [Ohm.m] x 3,63 [m]
  camada #3: 1746,33 [Ohm.m] x 8 [m]
  camada #4: 2406,72 [Ohm.m] x
Ajuste da Estratificação da Resistividade do Solo:
espaçamento   medida      calculada   desvio
  [m]          [Ohm.m]    [Ohm.m]    %
  1,00        1228,99    1225,54     0,28
  2,00        1108,44    1111,46    -0,27
  4,00        1166,12    1161,96     0,36
  8,00        1376,88    1381,34    -0,32
 16,00        1700,02    1697,92     0,12
erro RMS = 0 %

Diagrama:

```

R1= 1570.31	H1= 0.44		
R2= 1036.00		H2= 4.07	
R3= 1746.33			H3= 12.07
R4= 2406.72			H4= Inf.

Fonte: (Tecat Plus 6.3, 2018).

No relatório descritivo da resistividade, é possível notar que o TecAt mostra a porcentagem de erro que possa ter ocorrido no decorrer das medições. Uma ferramenta que mostra ao seu usuário o quão foi precisa a medição. Neste estudo de caso, por ter retornado 0% de erro, não houve necessidade de refazer as medições.

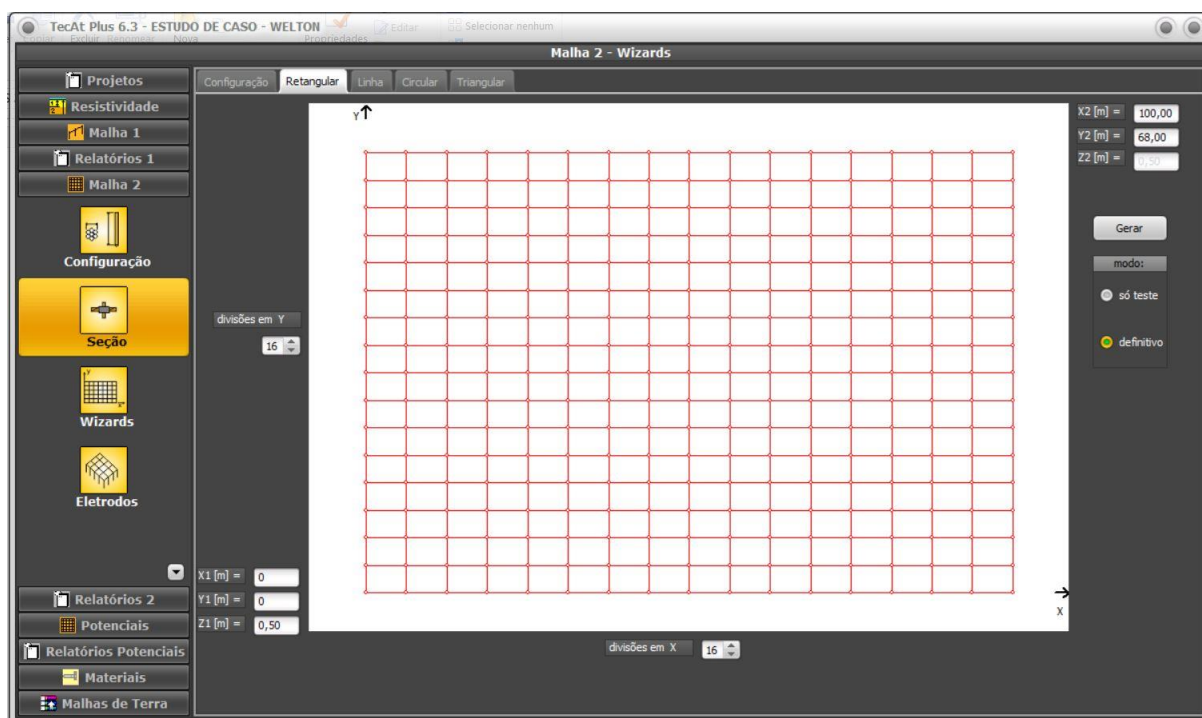
O TecAt recomenda que para erros acima de 30% seja refeita as medições.

A próxima ação tomada, foi a de dimensionar a malha de aterramento no solo estratificado, buscando alcançar valores similares aos calculados manualmente.

Logo, utilizando das dimensões, quantidades de hastes e cabos condutores da Malha de Aterramento 3, e também os diâmetros usuais de cabos condutores e

hastes para aterramento, inseriu-se no TecAt a malha, conforme mostra a Figura 3.19.

**Figura 3.19** – Simulação da Malha de Aterramento 3 no TecAt



Fonte: (Tecat Plus 6.3, 2018).

Posteriormente, foi solicitado ao *software*, o cálculo de resistência da malha, e o mesmo retornou com um relatório descritivo constando o valor 9,99  $\Omega$ . A Figura 3.20 mostra um extrato do relatório contendo o valor calculado pelo programa para a resistência da malha.

**Figura 3.20** – Extrato do Relatório Descritivo da Malha

```
Dados do Projeto:
Projeto: ESTUDO DE CASO - WELTON
Cliente:
Data: 15/05/2018
Local: PROXIMIDADES DO UNICEUB

Nº de camadas: 4
camada #1: 1570,31 [Ohm.m] x 0,44 [m]
camada #2: 1036 [Ohm.m] x 3,63 [m]
camada #3: 1746,33 [Ohm.m] x 8 [m]
camada #4: 2406,72 [Ohm.m] x

Tempo de processamento: 0,097 s
Resistência da Malha [Ohm] = 9,99
Máximo potencial da Malha [V] = 9989,01
```

Fonte: (Tecat Plus 6.3, 2018).

## 4. TESTES E RESULTADOS ALCANÇADOS

Neste capítulo será discorrido uma avaliação dos resultados obtidos, que se dará por meio da comparação entre o método calculado manualmente e o método computacional. Segue as avaliações:

### 4.1 Cálculo da Resistividade

Após a realização das medições, o primeiro passo foi o de calcular os valores das resistividades para cada espaçamento dos eletrodos, 1,2,4,8 e 16 metros. Este cálculo foi realizado utilizando as equações propostas por Frank Wenner, que possibilitou encontrar valores exatamente iguais entre os resultados calculados e os computacionais. O Quadro 4.1 expõe os dois resultados obtidos, tanto o calculado manualmente, quanto o resultado obtido através da simulação no TecAt.

**Quadro 4.1** – Comparativo das Resistividades do Solo

<b>Espaçamento (m)</b>	<b>Resistividade do Solo Calculada Manualmente</b>	<b>Resistividade do Solo Simulada no TecAt</b>
<b>1</b>	1228,99 $\Omega$ .m	1228,99 $\Omega$ .m
<b>2</b>	1108,44 $\Omega$ .m	1108,44 $\Omega$ .m
<b>4</b>	1166,12 $\Omega$ .m	1166,12 $\Omega$ .m
<b>8</b>	1376,87 $\Omega$ .m	1376,88 $\Omega$ .m
<b>16</b>	1700,02 $\Omega$ .m	1700,02 $\Omega$ .m

Fonte: autoria própria.

Com este comparativo, é adequado considerar que as equações foram utilizadas corretamente para o cálculo manual da resistividade, haja vista que foram encontrados os mesmos valores na simulação feito no *software*.

### 4.2 Avaliação das Medições

A segunda etapa após a obtenção dos valores de resistividade, foi feita a verificação quanto ao grau de erro existente nas medições realizadas no solo do estudo de caso. Tal verificação, realizada no item 3.3 do capítulo 3, foi feita

considerando desvios relativos de no máximo 50%, a mesma porcentagem inserida no *software*, que por sua vez, também fez esta verificação. Assim, foi possível testar qual dos dados de medição foram coletados corretamente ou erroneamente.

Como resultado da análise feita no item 3.3 do capítulo 3, não obtivemos nenhum valor que extrapolasse o desvio relativo de 50%, concluindo que todos os dados de medição estavam corretos, não havendo necessidade alguma de realizar novas medições.

No *software* não foi diferente, conforme mostra a Figura 4.1, o erro encontrado nas medições foi de 0%, considerando o mesmo desvio relativo empregado no item 3.3 do capítulo 3. Sendo assim, é apropriado afirmarmos que a medição realizada em campo obteve dados coerentes, tendo em vista que não foi encontrado nenhum percentual de erro, tanto na simulação via *software* quanto na análise realizada manualmente.

**Figura 4.1** – Extrato 2 do Relatório Descritivo da Resistividade

```

Configuração:
Modelo:      Wenner
Fórmula:     Completa
Prof. med.:  0,3
Exclusão %: 50 ← Desvio Relativo
Esp. mín.:  0,55
Aparelho:    Terrômetro Digital MEGABRAS
Resultado:
Nº de camadas: 4
  camada #1: 1570,31 [Ohm.m] x 0,44 [m]
  camada #2: 1036 [Ohm.m] x 3,63 [m]
  camada #3: 1746,33 [Ohm.m] x 8 [m]
  camada #4: 2406,72 [Ohm.m] x
Ajuste da Estratificação da Resistividade do Solo:
espaçamento  medida      calculada  desvio
  [m]         [Ohm.m]    [Ohm.m]   %
  1,00       1228,99   1225,54   0,28
  2,00       1108,44   1111,46  -0,27
  4,00       1166,12   1161,96   0,36
  8,00       1376,88   1381,34  -0,32
 16,00       1700,02   1697,92   0,12
erro RMS = 0 % ← Porcentagem de Erro Detectado

```

Fonte: figura adaptada de (Tecat Plus 6.3, 2018).

### 4.3 Estratificação

A próxima etapa do desenvolvimento do projeto, foi a de modelar as camadas do solo, ou seja, realizar a estratificação. A modelagem foi realizada tanto manualmente, como mostra o item 3.4, quanto por simulação no TecAt, de acordo com a Figura 4.2.

**Figura 4.2** – Estratificação do Solo via software

Resultado:

Nº de camadas: 4

camada #1: 1570,31 [Ohm.m] x 0,44 [m]

camada #2: 1036 [Ohm.m] x 3,63 [m]

camada #3: 1746,33 [Ohm.m] x 8 [m]

camada #4: 2406,72 [Ohm.m] x

Fonte: (Tecat Plus 6.3, 2018).

Cumprindo com o que foi dito no prefácio deste capítulo, foi feito um comparativo para verificar a similaridade entre o método calculado manualmente e o método computacional. O Quadro 4.2 mostra os dados obtidos das duas estratificações.

**Quadro 4.2** – Comparativo das Estratificações

CAMADA	RESISTIVIDADE CALCULADA ( $\Omega.m$ )	RESISTIVIDADE TECAT ( $\Omega.m$ )
1ª	1550	1570,31
2ª	1095	1036
3ª	2161,239	1746,33
4ª	2400,535	2406,72

Fonte: autoria própria.

Analisando superficialmente os valores das resistividades das camadas, poderíamos dizer que há certa similaridade entre os valores. No entanto é necessário avaliar, não só os valores das resistividades das camadas, mas também suas profundidades, tendo em vista que, por conta de o solo ser heterogêneo, a sua



profundidade afeta seu comportamento resistivo.

Considerando esta informação, foi esboçado o Gráfico 4.1, onde podemos fazer um comparativo mais preciso entre as estratificações, pois agora consideramos dois parâmetros das camadas, seu valor resistivo e sua profundidade.

**Gráfico 4.1 – Estratificações do Solo**



Fonte: autoria própria.

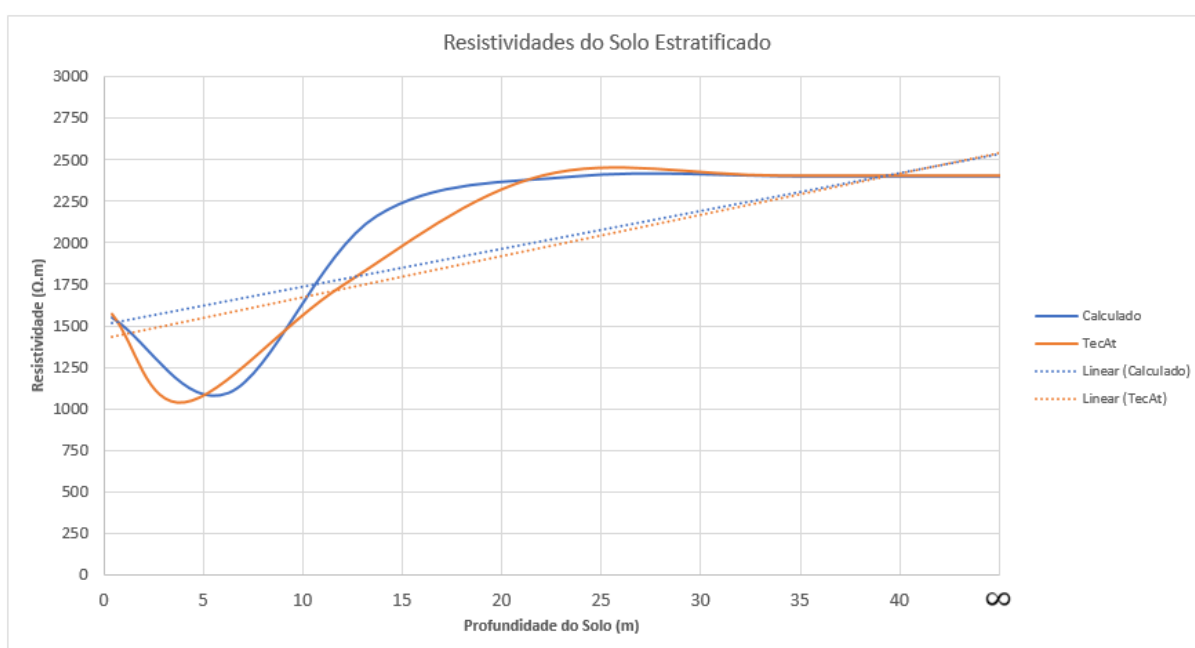
Na análise gráfica é possível notar que o comportamento entre as duas curvas apresentadas no Gráfico 4.1, são bem parecidos, apenas com algumas variações mais significativas entre 10 a 20 metros de profundidade. Estas variações se deram devido ao método utilizado na estratificação manual, senão vejamos:

- No item 3.4 do capítulo 3, o método utilizado na estratificação do solo foi o de Pirson, no qual consiste em uma análise gráfica de curvas para determinar os valores de resistividade e profundidade das camadas, condicionando margens para a não obtenção de valores extremamente precisos;
- Além disso, no método de Pirson é preciso por diversas vezes escolher valores arbitrariamente para  $a_1$ , fazendo com que o processo tenha uma certa perda de precisão, visto que tais valores arbitrários influenciam nos dados finais da estratificação.

Já o método utilizado pelo TecAt para modelar o solo, possui uma série de otimizações de resultados obtidos e de correção de erros ínfimos na estratificação, fazendo com que sua modelagem se torne mais precisa que a modelagem feita manualmente.

Conquanto, apesar do método da estratificação feita no item 3.4 do capítulo 3 não ser tão preciso quanto o método utilizado pelo TecAt, o Gráfico 4.2 mostra que as duas modelagens possuem linhas de tendência similares e valores aproximados.

**Gráfico 4.2** – Estratificações do Solo 2



Fonte: autoria própria.

Considerando as similaridades entre os valores das duas estratificações, é adequado afirmar que o método de Pirson foi empregado sem erros, resultando em uma correta modelagem do solo do estudo de caso.

#### 4.4 Da Análise da Resistividade Aparente

Com a resistividade aparente de  $\rho_a = 1911,576 \Omega.m$ , determinada no item 3.7 do capítulo 3, foi possível comprovar o real perfil em que se enquadra o solo do estudo de caso, através de uma análise no Quadro 1.1, tornando perceptível que o solo em questão apresenta um elevado índice de resistividade, dificultando a redução da resistência de aterramento a valores aceitáveis. Vale salientar que um solo considerado de baixa resistividade possui entre 50 e 100  $\Omega.m$ .

A Figura 4.3 mostra qual o possível tipo de solo que o estudo de caso se enquadra, conforme Quadro 1.1 retirado de (VISACRO, FILHO, 2016).

**Figura 4.3** – Possível Natureza do Solo do Estudo de Caso

Terra de jardim	140 a 480
Calcário fissurado	500 a 1.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000
Areia comum	3.000 a 8.000

Fonte: figura adaptada de (VISACRO, FILHO, 2016).

#### 4.5 Dimensionamento da Malha

Com a obtenção da resistividade aparente do solo do estudo de caso, foi iniciado o trabalho para a redução da resistência do aterramento, que se deu por intermédio do dimensionamento de algumas malhas de aterramento, começando pela Malha Inicial.

A Malha Inicial, apesar de não seguir nenhum critério para seu dimensionamento, possui extrema importância no projeto, pois ela serve de referência para que o projetista obtenha o valor inicial da resistência do sistema. Isso viabiliza os próximos dimensionamentos, pois a partir do valor inicial de resistência, é possível dizer o que é necessário implementar na malha para alcançar os resultados desejáveis.

As malhas dimensionadas foram as apresentadas no Quadro 4.3, junto com suas características:

**Quadro 4.3** – Características das Malhas

CARACTERÍSTICAS	MALHA INICIAL	MALHA 2	MALHA 3
<b>Área Total</b>	6800 m <sup>2</sup>	6800 m <sup>2</sup>	6800 m <sup>2</sup>
<b>Profundidade</b>	0,5 m	0,5 m	0,5 m
<b>Nº de Cabos</b>	6	14	34
<i>L<sub>cabo</sub></i>	504 m	1176 m	2856 m
<b>Nº de Hastes</b>	9	49	289
<i>L<sub>haste</sub></i>	27 m	147 m	867 m
<i>L<sub>total</sub></i>	531 m	1323 m	3723 m
<b>Resistência</b>	<b>13,83 Ω</b>	<b>11,67 Ω</b>	<b>10,74 Ω</b>

Fonte: autoria própria.

Como é possível verificar no Quadro 4.3, o valor de resistência de aterramento da Malha Inicial é de 13,83 Ω, não atendendo ao objetivo deste trabalho, que é a redução da resistência até aproximadamente 10 Ω. No entanto, a partir das dimensões da Malha Inicial, foi possível redimensioná-la para atingir o objetivo.

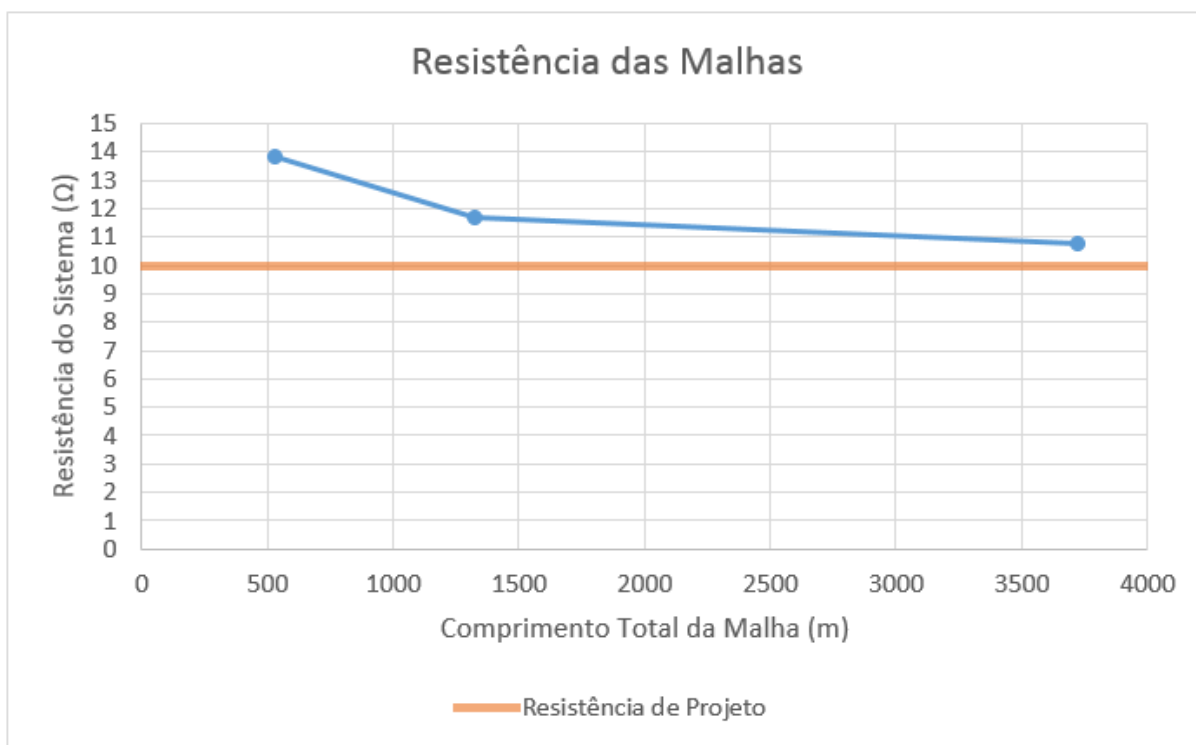
A lógica para a redução da resistência de aterramento é simples, basta efetuar uma análise da Equação 2.40, que é perceptível que o valor da resistência está diretamente associado a quatro parâmetros, a resistividade aparente do solo ( $\rho_a$ ), o comprimento total da malha ( $L_{total}$ ), sua profundidade ( $h$ ) e sua área. Onde, para reduzir o valor da resistência do aterramento, podemos:

- a. aumentar o comprimento da malha ( $L_{total}$ );
- b. aumentar a área total ocupada pela malha;
- c. aumentar a profundidade da malha ( $h$ ); ou
- d. empregar técnicas para diminuir a resistência aparente ( $\rho_a$ ) do solo, como tratamentos químicos ou físicos.

Neste estudo de caso, para reduzir a resistência do sistema, foi optado pelo aumento do comprimento da Malha Inicial, acrescentando mais hastes e mais cabos condutores. Assim, foram dimensionadas as Malhas 2 e 3, que apresentam resistência menor que a Malha Inicial. O Gráfico 4.3 mostra a redução da resistência ao passo

que se aumento o comprimento total da malha.

**Gráfico 4.3** – Resistência das Malhas



Fonte: autoria própria.

Em vistas ao Gráfico 4.3, é notório que o aumento do comprimento total da malha é capaz de reduzir o valor da resistência do sistema. Além disso, podemos concluir que, a Malha 3 atingiu o objetivo proposto neste trabalho, pois obteve o valor de 10,74  $\Omega$  em sua resistência.

Com o resultado conquistado no dimensionamento da malha, foi realizada a simulação da Malha 3 no *software*, objetivando encontrar resultados aproximados entre a resistência calculada manualmente e o resultado fornecido pelo TecAt.

O *software*, por sua vez, emitiu um relatório com o valor de 9,99  $\Omega$  para a resistência da Malha 3, conforme mostra a Figura 4.4:

**Figura 4.4 – Relatório Descritivo da Malha com Indicação da Resistência**

```
Dados do Projeto:
Projeto: ESTUDO DE CASO - WELTON
Cliente:
Data: 15/05/2018
Local: PROXIMIDADES DO UNICEUB

Nº de camadas: 4
camada #1: 1570,31 [Ohm.m] x 0,44 [m]
camada #2: 1036 [Ohm.m] x 3,63 [m]
camada #3: 1746,33 [Ohm.m] x 8 [m]
camada #4: 2406,72 [Ohm.m] x

Tempo de processamento: 0,097 s
Resistência da Malha [Ohm] = 9,99 ←
Máximo potencial da Malha [V] = 9989,01
```

Fonte: figura adaptada de (Tecat Plus 6.3, 2018).

Como é possível notar, os dois valores encontrados para a resistência da Malha 3, tanto o calculado manualmente ( $10,74 \Omega$ ) quanto o simulado no *software* ( $9,99 \Omega$ ), não são exatamente iguais. Esta desigualdade se deu devido a alguns fatores, como por exemplo a diferença existente entre as duas estratificações, a manual e a computacional.

No entanto, é nítido que os dois resultados obtidos estão bem próximos um do outro, e os dois atingiram o objetivo deste projeto. Sendo assim, é válido afirmar que a resistência do solo foi reduzida a valor da ordem de  $10 \Omega$ .

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo será tratado acerca das conclusões do projeto, contendo a opinião do autor com relação a metodologia aplicada para a projeção de sistemas de aterramentos elétricos, além da apresentação de futuros trabalhos ligados ao tema.

### 5.1 Conclusões

O objetivo do trabalho proposto foi a projeção de um sistema de aterramento, capaz de reduzir a resistência do solo ao ponto de alcançar valores aproximados a  $10 \Omega$ . Como objetivos específicos, foram propostos: o estudo dos fatores que contribuem para os valores da resistência de aterramento; a localização de um terreno adequado para o estudo de caso; a compreensão e utilização de um terrômetro; a obtenção de dados coerente da resistividade do solo na medição; a modelagem do solo por meio da estratificação; a definição da resistividade aparente do solo; o dimensionamento do sistema de aterramento; a obtenção de valores da ordem de 10 (dez) ohms para a resistência do sistema de aterramento; e por fim, a simulação e a comparação entre o método computacional e o método manual.

Em exame aos resultados alcançados, é possível ratificar que os objetivos propostos foram cumpridos, isso porque o sistema foi projetado: em cima de valores reais de medição e não fictícios; foi utilizado o método mais indicado para fazer a medição; foram empregadas técnicas de modelagem do solo; foram dimensionadas diversas malhas de aterramento afim de reduzir a resistência do solo; foi dimensionada uma malha de aterramento capaz de atingir o objetivo proposto no trabalho; foram simuladas todas as etapas do projeto em um *software* específico para a finalidade; e foram obtidos resultados similares com a comparação entre a metodologia computacional e a calculada manualmente.

É cabido argumentar que, o solo escolhido para o estudo de caso, apresentou elevados índices de resistividade em relação ao que é considerado um solo de baixa resistividade, entretanto, a metodologia aplicada no projeto condicionou uma redução significativa no valor da resistência de aterramento. Sendo assim, o sistema cumpriu com seu propósito.

Além de expor os objetivos alcançados com o projeto, é importante destacar as dificuldades encontradas no seu decorrer, como a complexidade de todos os

procedimentos matemáticos empregados, o esforço exaustivo na cravação dos eletrodos de medição em um solo bastante duro, a difícil tarefa de aprender a simular malhas de aterramento no *software* TecAt e a difícil procura do local do estudo de caso, que por sua vez, não podia apresentar obstáculos que impedissem a atividade de medição, muito menos possuir estruturas capazes de interferir nos resultados.

Vale lembrar que as dificuldades anteriormente elencadas, foram apenas para a fase de planejamento do sistema de aterramento que, no que lhe concerne, não está incluso a difícil tarefa de instalar toda a malha de aterramento no solo. Basta imaginar o quão complexo seriam as escavações para enterrar as hastes e os cabos condutores do sistema de terra.

Por fim, é de parecer favorável deste autor, que a metodologia empregada para realizar o dimensionamento do sistema de aterramento elétrico, foi utilizada de maneira correta e eficaz, tendo em vista o alcance dos objetivos propostos e os comparativos realizados entre os resultados de simulações computacionais e os resultados obtidos por intermédio de cálculos manuais.

## 5.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Ainda que a metodologia proposta para o dimensionamento do sistema está funcionando dentro do previsto, há uma necessidade no aprimoramento da técnica para obtenção de valores mais precisos ou ainda alcançar objetivos com maior facilidade.

Uma boa proposta de trabalho futuro é o estudo das diferentes maneiras de modelar um solo, na busca de uma estratificação mais precisa que o método de Pirson.

Outra proposta para trabalhos futuros, é o estudo acerca dos métodos existentes para realizar o cálculo da resistência do aterramento, haja vista que no atual cenário literário são inúmeras as formas de realizar o cálculo da resistência.

Uma última proposta, é o estudo a respeito dos múltiplos procedimentos de redução da resistência do solo, por meio de tratamentos químicos ou físicos. Estes procedimentos por sua vez, tem ganhado bastante espaço no mercado devido aos seus bons resultados em solos com elevados índices de resistividade.



## REFERÊNCIAS

- ARRENDAMIENTO de equipos de medición para obras de electrificación. **pyme.pe**. Disponível em: <<https://www.pyme.pe/iecontratistasgenerales.a.c.>>. Acesso em: 12 abr 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro. 2004.
- CRUZ, E. C. A.; ANICETO, L. A. **Instalações elétricas**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- FLORES, A. J. M. **Análise e aplicação de métodos para o cálculo da resistência de terra em sistemas com N eletrodos instalados em solos heterogêneos**. Universidade do Porto. Porto, p. 98. 2014.
- INFORMAÇÕES gráficas e numéricas sobre a realidade da Energia Elétrica no Brasil. **Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade**, 2018. Disponível em: <<http://www.abracopel.org/estatisticas>>. Acesso em: 28 junho 2018.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Guide for Safety in AC Substation Grounding**. New York. 2000.
- JÚNIOR, F. S. D. S. Trabalho de medidas elétricas. **Ebah**, 2013. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgHYUAH/trabalho-medidas-eletricas?part=2>>. Acesso em: 11 maio 2018.
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: SAGRA - D.C. LUZZATTO, 1995.
- MAMEDE, FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro: Grupo Editorial Nacional, 2010.
- ORIENTAÇÕES para dimensionamento da malha de aterramento do SPDA. **Termotécnica**, 2017. Disponível em: <<https://tel.com.br/orientacoes-para-dimensionamento-da-malha-de-aterramento-do-spda/>>. Acesso em: 10 jun 2018.
- PORTIFÓLIO. **IHM Mecatrônica**, 2015. Disponível em: <<http://ihmmecatronica.com/portfolio>>. Acesso em: 4 abr 2018.
- SETOR de Grandes Áreas Norte. **Google Maps**, 2018. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/search/maps/@-15.7644446,-47.8985518,327a,35y,252.47h/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 21 maio 2018.
- Tecat Plus 6.3. [S.l.]. 2018.
- TERRÔMETRO Digital. **MEGABRAS**, 2017. Disponível em: <[https://www.megabras.com/pt-br/produtos/terrometro/terrometro-digital-MTD20KWe.php?gclid=Cj0KCQjw3InYBRCLARIsAG6bfMTyhwwfe2rlp-CG8AYrBsmtw2DhwvJuIA5d-S8yHkCtTV2kZ2Y6aIzEaAq8sEALw\\_wcB](https://www.megabras.com/pt-br/produtos/terrometro/terrometro-digital-MTD20KWe.php?gclid=Cj0KCQjw3InYBRCLARIsAG6bfMTyhwwfe2rlp-CG8AYrBsmtw2DhwvJuIA5d-S8yHkCtTV2kZ2Y6aIzEaAq8sEALw_wcB)>. Acesso em: 21 maio 2018.
- UM aterramento com hastes. **Gerador de Preços**, 2013. Disponível em: <[http://www.brasil.geradordeprecos.info/obra\\_nova/Instalacoes/Eletricas/Aterramentos/Aterr](http://www.brasil.geradordeprecos.info/obra_nova/Instalacoes/Eletricas/Aterramentos/Aterr)

amento\_com\_haste\_0\_0\_0\_2\_0\_0\_0.html>. Acesso em: 17 abr 2018.

VISACRO, FILHO, S. **Aterramentos Elétricos**. São Paulo: Artliber Editora, 2016.