



**UFC**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

**CAMPUS DE CRATEÚS**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANTONIO LUCKYLO SOUSA FEITOSA**

**DIMENSIONAMENTO DE UMA MALHA DE ATERRAMENTO PARA  
EDIFICAÇÕES URBANAS NA CIDADE DE CRATEÚS**

**CRATEÚS**

**2026**

ANTONIO LUCKYLO SOUSA FEITOSA

DIMENSIONAMENTO DE UMA MALHA DE ATERRAMENTO PARA EDIFICAÇÕES  
URBANAS NA CIDADE DE CRATEÚS

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

Orientador: Prof. D<sup>o</sup>. Antonio Francisco Gomes  
Furtado Filho.

CRATEÚS

2026

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

---

- F336d Feitosa, Antonio Luckylo Sousa.  
Dimensionamento de uma malha de aterramento para edificações urbanas na cidade de Crateús /  
Antonio Luckylo Sousa Feitosa. – 2026.  
58 f. : il.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,  
Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2026.  
Orientação: Prof. Dr. Antonio Francisco Gomes Furtado Filho.
1. malha de aterramento. 2. aterramento elétrico. 3. resistividade do solo. I. Título.

CDD 620

---

ANTONIO LUCKYLO SOUSA FEITOSA

DIMENSIONAMENTO DE UMA MALHA DE ATERRAMENTO PARA EDIFICAÇÕES  
URBANAS NA CIDADE DE CRATEÚS

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

Orientador: Prof. Dro. Antonio Francisco Gomes  
Furtado Filho.

Aprovado em: 20/01/2026

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Antonio Francisco Gomes Furtado Filho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus de Crateús

---

Prof. Luis Felipe Cândido  
Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus de Crateús

---

Prof. Juscelino Sales Chaves  
Universidade Estadual do Vale do Acaraú (UVA), Campus de Sobral

## AGRADECIMENTOS

À Deus, que de formas inimagináveis atua em minha vida e me guia sempre para o melhor caminho.

À minha família, em especial aos meus pais, Antonio Hernandez e Maria Evaneide, vocês são meu maior ponto de apoio e porto seguro, a minha base e quem fundamenta o ser humano que sou. Além da minha irmã, Maria Lanna, quem eu me espelho e tenho muita admiração e carinho, amo vocês.

À minha amada, Vivian, você tem feito os últimos anos da minha vida serem maravilhosos e é fundamental para mim, eu te amo.

Aos meus amigos, alguns que seguem comigo desde os 6 anos de idade, o apoio de vocês trouxe leveza para minha trajetória.

Ao meu professor orientador, Dr. Antonio Francisco, que me ajudou constantemente na escrita do meu trabalho. Além, é claro, da Universidade Federal do Ceará que me trouxe um leque de conhecimento e maturidade.

Por fim, agradeço a cada um que participou diretamente ou indiretamente dessa jornada, sem vocês nada disso seria possível, deixo registrado aqui a minha eterna gratidão.

“O segredo do sucesso é a constância do propósito” (Benjamin Disraeli)

## RESUMO

O sistema de aterramento é um elemento fundamental para a segurança das instalações elétricas, pois tem a função de proteger pessoas e equipamentos contra choques elétricos e sobretensões decorrentes de falhas ou descargas elétricas. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar o dimensionamento de uma malha de aterramento para uma residência padrão localizada no município de Crateús, no estado do Ceará. Com o intuito de encontrar a natureza do solo, foram realizadas medições em 3 aterramentos de transformadores da cidade, encontrando-se um solo argiloso e plástico. A faixa de resistividade desse solo foi considerada entre  $1 \Omega.m$  e  $50 \Omega.m$ , e a partir disso foi realizado o dimensionamento da malha. Por fim, foram avaliadas as tensões de passo e de toque e a resistência elétrica do aterramento utilizando a malha, de modo a garantir que os valores obtidos estejam dentro dos limites permissíveis para a segurança do corpo humano, conforme as normas técnicas determinam. Os resultados obtidos mostraram que uma malha de aterramento em forma de anel circundando a residência, enterrada a 0,6 m de profundidade utilizando um condutor de cobre nu com uma área de seção transversal de  $50 \text{ mm}^2$ , é uma ótima forma de garantir um aterramento seguro e eficiente.

**Palavras-chave:** malha de aterramento; aterramento elétrico; resistividade do solo.

## ABSTRACT

The grounding system is a fundamental element for the safety of electrical installations, as it aims to protect people and equipment against electric shocks and overvoltages resulting from faults or electrical discharges. In this context, this study aims to perform the design of a grounding grid for a standard residential building located in the municipality of Crateús, in the state of Ceará, Brazil. In order to identify the nature of the local soil, measurements were carried out on three grounding systems of power transformers in the city, indicating a clayey and plastic soil. The soil resistivity range was considered between  $1 \Omega \cdot \text{m}$  and  $50 \Omega \cdot \text{m}$ , and based on these values, the grounding grid was designed. Subsequently, step and touch voltages, as well as the electrical resistance of the grounding system, were evaluated to ensure that the obtained values remain within the permissible limits for human safety, as established by technical standards. The results showed that a ring-shaped grounding grid surrounding the residence, buried at a depth of 0,6 m and using a bare copper conductor with a cross-sectional area of  $50 \text{ mm}^2$ , represents an effective solution to ensure a safe and efficient grounding system.

**Keywords:** grounding grid; electrical grounding; soil resistivity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do método de Wenner.....	12
Figura 2 - Exemplo de estratificação do solo.....	16
Figura 3 - Curva de resistividade do solo.....	17
Figura 4 - A) Tensão de passo; B) Circuito elétrico equivalente.....	25
Figura 5 - A) Tensão de toque; B) Circuito elétrico equivalente.....	27
Figura 6 - Fluxograma.....	33
Figura 7 - Planta baixa da casa padrão de Crateús.....	35
Figura 8 - Mapa de solos do Ceará.....	36
Figura 9 - Terrômetro disponibilizado pela empresa Pro Energy.....	37
Figura 10 - Disposição geral das hastes.....	38
Figura 11 - Disposição do cabo amarelo.....	38
Figura 12 - Disposição do cabo vermelho.....	39
Figura 13 - Resistência medida.....	39
Figura 14 - Resistência medida (teste 2).....	40
Figura 15 - Disposição do cabo verde (teste 2).....	40
Figura 16 - Disposição do cabo amarelo (teste 2).....	41
Figura 17 - Resistência medida (teste 3).....	42
Figura 18 - Disposição do cabo verde (teste 3).....	42
Figura 19 - Disposição do cabo vermelho (teste 3).....	43
Figura 20 – Curva de resistividade do solo.....	44
Figura 21 – Modelo proposto.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistividade dos solos.....	11
Tabela 2 - Número mínimo de linhas de SEV.....	13
Tabela 3 - Medidas de resistividade média.....	14
Tabela 4 - Fator de multiplicação.....	18
Tabela 5 - Fator K3 para o solo de duas camadas.....	19
Tabela 6 - Valores dos parâmetros para os tipos de condutores mais utilizados em malhas...	22
Tabela 7 - Temperatura máxima de diferentes conexões.....	23
Tabela 8 - Valores de Kf para o cobre.....	24
Tabela 9 - Variáveis iniciais.....	44
Tabela 10 - Resultados de resistência e tensão.....	49

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NBR	Norma Brasileira
SEV	Sondagem Elétrica Vertical
UFC	Universidade Federal do Ceará

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>2</b>
<i>1.1.1 Objetivo Geral</i> .....	<i>2</i>
<i>1.1.2 Objetivos Específicos</i> .....	<i>2</i>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 Resistividade do solo</b> .....	<b>3</b>
<i>2.1.1 Medição da resistividade elétrica do solo pelo método de Wenner</i> .....	<i>4</i>
<i>2.1.2 Fatores de influência na resistividade do solo</i> .....	<i>6</i>
<i>2.1.2.1 Composição química do solo</i> .....	<i>6</i>
<i>2.1.2.2 Umidade</i> .....	<i>7</i>
<i>2.1.2.3 Temperatura</i> .....	<i>7</i>
<i>2.1.2.4 Estratificação do solo</i> .....	<i>8</i>
<b>2.2 Resistividade aparente do solo (<math>\rho_a</math>)</b> .....	<b>8</b>
<i>2.2.1 Estratificação do solo em duas camadas</i> .....	<i>9</i>
<i>2.2.2 Determinação da resistividade média do solo (<math>\rho_m</math>)</i> .....	<i>9</i>
<i>2.2.3 Determinação da resistividade aparente do solo (<math>\rho_a</math>)</i> .....	<i>10</i>
<b>2.3 Estabelecimento de uma geometria básica de malha</b> .....	<b>12</b>
<i>2.3.1 Cálculo preliminar da resistência de aterramento</i> .....	<i>12</i>
<i>2.3.2 Equação de Dwight</i> .....	<i>13</i>
<b>2.4 Dimensionamento do condutor da malha</b> .....	<b>13</b>
<i>2.4.1 Dimensionamento mecânico</i> .....	<i>13</i>
<i>2.4.2 Dimensionamento térmico</i> .....	<i>14</i>
<i>2.4.3 Conexões</i> .....	<i>15</i>
<b>2.5 Cálculo das tensões permissíveis</b> .....	<b>16</b>
<i>2.5.1 Corrente de choque de longa duração (<math>I_{chld}</math>)</i> .....	<i>16</i>
<i>2.5.2 Corrente de choque de curta duração (<math>I_{chcd}</math>)</i> .....	<i>16</i>
<i>2.5.3 Tensão de passo</i> .....	<i>17</i>

2.5.4 Tensão de toque .....	18
2.6 Equações simplificadas de potenciais no solo .....	20
2.6.1 Equação simplificada relacionada à tensão de toque .....	20
2.6.2 Equação simplificada relacionada à tensão de passo .....	21
2.7 Cálculo da corrente de malha .....	22
2.7.1 Corrente de malha simétrica eficaz .....	22
2.7.2 Corrente de falta .....	22
2.7.3 Fator de decremento $D_f$ .....	23
2.7.4 Fator de projeção $C_p$ .....	23
2.7.5 Corrente de malha .....	23
3 MÉTODO DE PESQUISA .....	24
3.1 Resistividade aparente do solo .....	24
3.2 Dimensionamento dos condutores .....	24
3.3 Cálculo dos potenciais máximos permitidos .....	25
3.4 Modelo inicial da malha de aterramento .....	25
3.5 Cálculo dos potenciais dentro da malha .....	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	26
4.1 Estudo de caso .....	26
4.2 Considerações iniciais .....	27
4.3 Determinação aproximada da resistividade do solo .....	28
4.3.1 Resistividade do solo 1 .....	29
4.3.2 Resistividade do solo 2 .....	31
4.3.3 Resistividade do solo 3 .....	32
4.3 Corrente de malha .....	36
4.4 Resistividade aparente do solo .....	36
4.5 Cálculo preliminar da resistência de aterramento .....	37
4.6 Dimensionamento mecânico e térmico do condutor da malha .....	37

<b>4.7 Cálculo das correntes de choque de longa e de curta duração .....</b>	<b>37</b>
<b>4.8 Tensões admissíveis .....</b>	<b>38</b>
<b>4.9 Dimensionamento da malha de aterramento .....</b>	<b>39</b>
<i>4.9.1 Modelo proposto .....</i>	<i>39</i>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>42</b>
<b>5.1 Conclusão geral .....</b>	<b>42</b>
<b>5.2 Sugestão de trabalhos futuros .....</b>	<b>42</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O termo aterramento se refere à terra propriamente dita ou a uma grande massa que se utiliza em seu lugar. Quando falamos que algo está “aterrado”, queremos dizer então que, pelo menos, um de seus elementos está propositalmente ligado à terra (Costa; Moreno, 2018). Nesse contexto, uma massa condutora é um conjunto de material condutor interconectado que permite uma fácil dispersão de cargas nela injetadas. Neste caso, a terra é uma grande massa condutora e, portanto, uma escolha adequada para ser o referencial de vários sistemas elétricos (Mattos, 2014). Contudo, o aterramento residencial é um sistema de segurança que direciona possíveis fugas de corrente elétrica para a terra, evitando choques elétricos em pessoas e danos em equipamentos.

Destacando o aterramento residencial como um sistema de segurança, o primeiro fator a ser analisado é a integridade da vida humana. Nesse sentido, a reação do organismo à passagem da corrente elétrica pelo corpo é caracterizada como choque elétrico. Sendo o corpo humano condutor. Como resultado de um choque elétrico pode-se ter sensações que envolvem desde um leve “formigamento”, às contrações musculares dolorosas, à lesão muscular e até à parada cardíaca (Universidade Estadual Paulista, 2006).

O segundo fator a ser analisado é os danos em equipamentos elétricos que uma sobrecorrente pode causar, como o risco de perda dos próprios equipamentos e uma possível geração de incêndio. Além do risco de choque elétrico pelo contato direto ou indireto com eletricidade e pela exposição ao arco elétrico, a eletricidade é uma das principais causas da ocorrência de incêndios, explosões e acidentes ampliados em indústrias, comércios e residências (Confederação Nacional da Indústria, [2019]). Portanto, é evidente que o aterramento possui um papel fundamental na garantia da segurança das instalações elétricas residenciais.

O sistema de aterramento residencial pode ser realizado de diversas formas, utilizando diferentes eletrodos para fazerem a dissipação da corrente de fuga. Logo, os eletrodos de aterramentos típicos incluem eletrodos na forma de anel, eletrodos na forma de haste (vertical), eletrodos na forma de malha, cabos com efeitos de eletrodo e eletrodos de aterramento da fundação (Leonardo Power Quality Initiative, 2006). Dessa forma, toda edificação deve dispor de uma infraestrutura de aterramento, denominada eletrodo de aterramento, sendo admitido no mínimo o uso de anel metálico enterrado, circundando o perímetro da edificação e

complementado, quando necessário, por hastes verticais e/ou cabos dispostos radialmente (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

A escolha e aplicação adequada desses tipos de eletrodos de aterramento é essencial para garantir um bom desempenho no sistema de segurança elétrica de uma residência. Nesse sentido, uma malha de aterramento dimensionada corretamente, também é capaz de contribuir para a eficiência do sistema de aterramento de uma edificação, considerando as propriedades dessa residência e o tipo de solo dessa região. Dessa forma, o presente estudo busca responder a seguinte indagação: Quais as características de uma malha de aterramento para uma residência típica do município de Crateús?

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo Geral***

Realizar o dimensionamento de uma malha de aterramento para uma residência padrão do município de Crateús.

### ***1.1.2 Objetivos Específicos***

- a) Determinar a resistividade média para o solo de Crateús
- b) Estabelecer uma geometria e definir os condutores para a malha de aterramento
- c) Calcular as tensões máximas permissíveis para o corpo humano
- d) Calcular a corrente que escoar para a malha de aterramento
- e) Determinar a resistência de aterramento e as tensões de toque e de passo na malha

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Resistividade do solo

Para elaborar um sistema de aterramento eficiente, é essencial conhecer previamente as características do solo, especialmente no que se refere à uniformidade da sua composição. A Tabela 1 a seguir apresenta a resistividade de diferentes tipos de solo, com valores mínimos e máximos, que podem ser utilizados como referência em projetos de malhas de aterramento, caso não haja medições específicas disponíveis. No entanto, para obter resultados mais precisos quanto à resistividade do solo, é necessário realizar medições utilizando equipamentos apropriados como, por exemplo, o terrômetro.

Tabela 1 – Resistividade dos solos

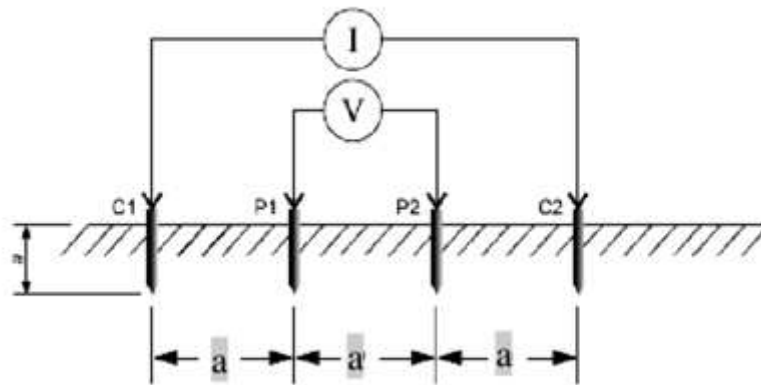
Natureza dos solos	Resistividade (Ohm.m)	
	Mínima	Máxima
Solos alagadiços e pantanosos	-	30
Lodo	20	100
Húmus	10	150
Argilas plásticas	-	50
Argilas compactas	100	200
Terra de jardins com 50% de umidade	-	140
Terra de jardins com 20 % de umidade	-	480
Argila seca	1500	5000
Argila com 40 % de umidade	-	80
Argila com 20 % de umidade	-	330
Areia com 90 % de umidade	-	1300
Areia comum	3000	8000
Solo pedregoso nu	1500	3000
Solo pedregoso coberto com relva	300	500
Calcários moles	100	400
Calcários compactos	100	5000
Calcários fissurados	500	1000
Xisto	50	300
Micaxisto	-	800
Granito e arenito	500	10000

Fonte: Mamade Filho (2016)

### 2.1.1 Medição da resistividade elétrica do solo pelo método de Wenner

Uma das maneiras de se medir a resistividade elétrica do solo é pelo método de Wenner, utilizando o terrômetro como um equipamento para realizar a leitura dos valores de resistência do solo ( $R$ ), indicados no aparelho, em  $\Omega$ . Dessa forma, o método consiste em colocar 4 eletrodos em linha, separados por uma distância “a” e cravados no solo com uma profundidade de 20 cm, ou o suficiente para que o eletrodo permaneça firme no solo. Os dois eletrodos extremos estão ligados aos terminais de corrente C1 e C2, o terrômetro possui uma fonte interna que faz com que uma corrente  $I$  circule entre esses terminais. Os dois eletrodos centrais estão ligados aos terminais de potencial P1 e P2, logo o aparelho consegue registrar a diferença de potencial entre essas duas hastes. O esquema do método de Wenner é demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema do método de Wenner

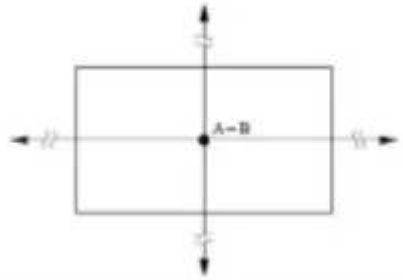
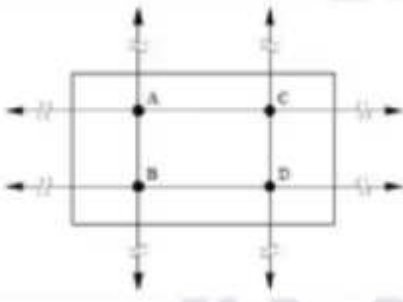
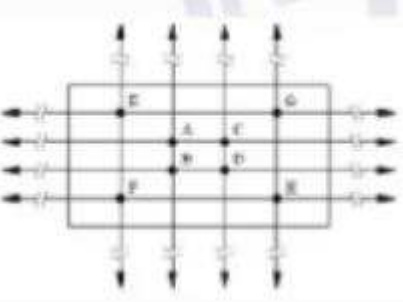
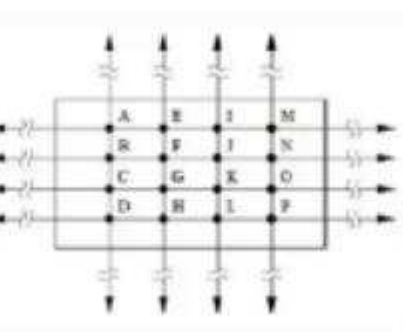


Fonte: Arcangeo [2021]

De acordo com a área do terreno, devem ser realizadas as medições em um número mínimo de linhas, a Figura 2 apresenta croquis com sugestões de linhas de medições para diferentes áreas retangulares, indicando o número mínimo de Sondagens Elétricas Verticais (SEV), que devem ser uniformemente distribuídas nos dois eixos da área a ser prospectada.

Tabela 2 – Número mínimo de linhas de SEV

Croquis das linhas de medição (SEV)	Área do terreno ( $m^2$ )	Número mínimo de SEV
	$S \leq 1000$	2

		
	$1000 < S \leq 2500$	4
	$2500 < S \leq 10000$	8
	$10000 < S \leq 20000$	16

Fonte: NBR 7117 (2020)

Durante a medição da resistência do solo utilizando o método de Wenner, os dados devem ser anotados em uma tabela, conforme a Tabela 3. A resistividade elétrica ( $\rho$ ) pode ser

calculada segundo a NBR 7177 utilizando a Equação (1), considerando a resistência (R) como a divisão entre a tensão elétrica (V) e a corrente elétrica (I)  $R = \frac{V}{I}$  teremos:

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

Em que: R = Resistência elétrica medida pelo terrômetro ( $\Omega$ );  $\alpha$  = Espaçamento entre as hastes (m); b = Profundidade da haste (m);  $\rho$  = Resistividade elétrica do solo ( $\Omega \cdot m$ ). Quando  $b \leq a/10$  a equação pode ser reduzida a Equação (2).

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

Com esses valores, é possível calcular a resistividade média para cada espaçamento considerado e calcular o desvio de cada medida em relação à média aritmética. Os valores de resistividade que tenham um desvio superior a 50 % em relação à média devem ser desprezados, caso houver muitos valores desviados da média, é conveniente repetir as medições em campo.

Tabela 3 – Medidas de resistividade média

Posição dos eletrodos	Resistência medida ( $\Omega$ )					Resistência média ( $\Omega$ )	Resistividade elétrica ( $\Omega \cdot m$ )
	Pontos medidos						
Distância (m)	A	B	C	D	E		
1							
2							
4							
8							
16							
32							

Fonte: Mamade Filho (2016)

### 2.1.2 Fatores de influência na resistividade do solo

A resistividade do solo varia em função de vários fatores, isso depende das condições em que o solo está submetido no instante da medição.

#### 2.1.2.1 Composição química do solo

A resistividade do solo é fortemente influenciada pela presença e pela concentração de sais solúveis e ácidos naturalmente presentes em sua composição. Sabe-se que, para diminuir a

resistência de uma malha de aterramento, é comum aplicar produtos químicos no solo ao redor do eletrodo de aterramento. Diversas substâncias químicas compostas por combinações de sais são utilizadas para esse fim. Quando misturadas com água, essas substâncias formam um gel, amplamente comercializado e altamente eficaz na redução da resistividade do solo. Essas substâncias possuem as seguintes características (Mamade Filho, 2016):

- são higroscópicas;
- dão estabilidade química ao solo;
- não são corrosivas;
- não são atacadas pelos ácidos;
- são insolúveis na presença de água;
- possuem longa duração

#### *2.1.2.2 Umidade*

A resistividade do solo e a resistência de uma malha de aterramento sofrem alterações significativas conforme a variação da umidade do solo, especialmente quando essa umidade cai para níveis inferiores a 20%. Isso ocorre devido à natureza condutiva que a água possui. Por isso, é fundamental que os eletrodos de aterramento sejam instalados a uma profundidade apropriada, de modo a garantir que o solo ao redor dos eletrodos esteja úmido o suficiente.

O nível de umidade do solo varia de acordo com a região geográfica e com a estação do ano. Em períodos de seca, esse valor pode ser de aproximadamente 10%, enquanto nas épocas chuvosas pode chegar a 35%. Dessa forma, o ideal é que as medições de resistividade do solo sejam feitas nos períodos de seca, considerando o pior cenário (Mamade Filho, 2016).

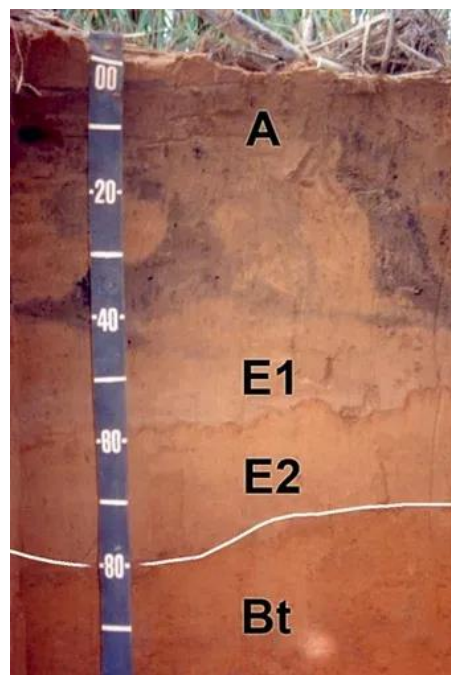
#### *2.1.2.3 Temperatura*

A resistividade do solo e a resistência de um sistema de aterramento sofrem grande impacto quando a temperatura ambiente cai abaixo de 0 °C. Em temperaturas superiores a esse valor, tanto a resistividade do solo quanto a resistência do aterramento tendem a diminuir. Em situações de curto-circuito entre fase e terra, quando as correntes são muito intensas, pode ocorrer a ebulição da água presente no solo ao redor do eletrodo. Esse processo reduz a umidade e aumenta a temperatura local, o que compromete significativamente o desempenho do sistema de aterramento.

#### 2.1.2.4 Estratificação do solo

A maior parte dos solos é composta de forma heterogênea, ou seja, apresenta várias camadas distintas. Logo, cada uma dessas camadas possui propriedades específicas, como o nível de umidade, grau de compactação, composição química e outros fatores. A Figura 2 exemplifica uma situação real de estratificação do solo. Dessa forma, cada camada também tem uma resistividade diferente. Em certos casos, as camadas do solo podem estar inclinadas ou até mesmo dispostas verticalmente, resultado de falhas geológicas. No entanto, os estudos que investigam o perfil do solo geralmente assumem que essas camadas são aproximadamente horizontais, já que configurações diferentes são menos comuns. Portanto, a análise da estratificação do solo é fundamental para compreender as características do terreno onde será instalada a malha de aterramento.

Figura 2 – Exemplo de estratificação do solo



Fonte: Silva, Lima e Testoni (2024)

## 2.2 Resistividade aparente do solo ( $\rho_a$ )

A resistividade aparente do solo é definida como a resistividade percebida por um determinado sistema de aterramento. Dessa forma, mesmo que o solo seja homogêneo, ele pode apresentar diferentes valores de resistividade dependendo da malha de aterramento utilizada. Além disso, uma mesma malha pode ter comportamentos distintos ao interagir com solos que possuem a mesma resistividade média.

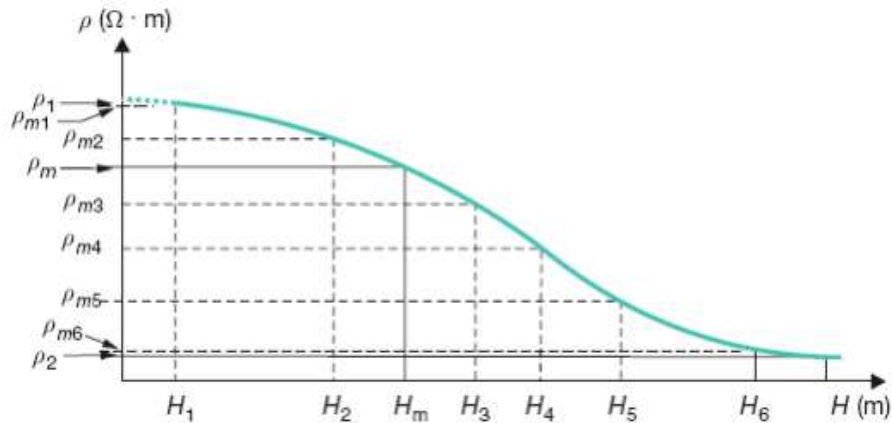
Para que seja possível determinar essa resistividade aparente, é necessário utilizar alguma das técnicas de modelagem disponíveis. Nesse estudo, será utilizada a modelagem de estratificação do solo em duas camadas, capaz de determinar a resistividade da primeira e segunda camada do solo. Portanto, com esses dois valores é possível realizar o cálculo da resistividade aparente do solo utilizando o Anexo A da NBR 15751.

### 2.2.1 Estratificação do solo em duas camadas

A estratificação do solo em duas camadas começa com o traçado da curva de resistividade média do solo. Deve-se representar no eixo H (profundidade da malha) os valores das distâncias entre as hastes e, no eixo  $\rho$  (resistividade do solo), as resistividades médias correspondentes aos pontos obtidos para cada distância entre hastes, conforme ilustrado na Figura 3. A curva deve ser estendida a partir do ponto ( $H_1$ ;  $\rho_{m1}$ ) até que alcance o eixo das resistividades, identificando assim o valor de  $\rho_1$ .

Para encontrar o valor de  $\rho_2$  (resistividade da camada mais profunda do solo), deve-se traçar uma assíntota à curva e prolongá-la até interceptar o eixo vertical (eixo das ordenadas).

Figura 3 – Curva de resistividade do solo



Fonte: Mamade Filho (2016)

### 2.2.2 Determinação da resistividade média do solo ( $\rho_m$ )

O valor da resistividade média do solo pode ser calculado utilizando a Equação (3):

$$\rho_m = \rho_1 \cdot k_1 \quad (3)$$

O valor de  $k_1$  é obtido pela Tabela 4 a partir da relação  $\rho_2/\rho_1$ .

Tabela 4 – Fator de multiplicação

Relação $\rho_2/\rho_1$	Fator K1	Relação $\rho_2/\rho_1$	Fator K1	Relação $\rho_2/\rho_1$	Fator K1	Relação $\rho_2/\rho_1$	Fator K1
0,0010	0,6839	0,30	0,8170	6,5	1,331	19	1,432
0,0020	0,6844	0,35	0,8348	7,0	1,340	20	1,435
0,0025	0,6847	0,40	0,8517	7,5	1,349	30	1,456
0,0030	0,6850	0,45	0,8676	8,0	1,356	40	1,467
0,0040	0,6855	0,50	0,8827	8,5	1,363	50	1,474
0,0045	0,6858	0,55	0,8971	9,0	1,369	60	1,478
0,0050	0,6861	0,60	0,9107	9,5	1,375	70	1,482
0,0060	0,6866	0,65	0,9237	10,0	1,380	80	1,484
0,0070	0,6871	0,70	0,9361	10,5	1,385	90	1,486
0,0080	0,6877	0,75	0,9480	11,0	1,390	100	1,488
0,0090	0,6882	0,80	0,9593	11,5	1,394	110	1,489
0,0100	0,6887	0,85	0,9701	12,0	1,398	120	1,490
0,0150	0,6914	0,90	0,9805	12,5	1,401	130	1,491
0,0200	0,6940	0,95	0,9904	13,0	1,404	140	1,492
0,0300	0,6993	1,00	1,0000	13,5	1,408	150	1,493
0,0400	0,7044	1,50	1,0780	14,0	1,410	160	1,494
0,0500	0,7095	2,00	1,1340	14,5	1,413	180	1,495
0,0600	0,7145	2,50	1,1770	15,0	1,416	200	1,496
0,0700	0,7195	3,00	1,2100	15,5	1,418	240	1,497
0,0800	0,7243	3,50	1,2370	16,0	1,421	280	1,498
0,0900	0,7292	4,00	1,2600	16,5	1,423	350	1,499
0,1000	0,7339	4,50	1,2780	17,0	1,425	450	1,500
0,1500	0,7567	5,00	1,2940	17,5	1,427	640	1,501
0,2000	0,7781	5,50	1,3080	18,0	1,429	1000	1,501
0,2500	0,7981	6,00	1,3200	18,5	1,430		

Fonte: Mamade Filho (2016)

Para se determinar a profundidade a que se encontra a resistividade média, deve-se introduzir o valor de  $\rho_m$  na curva da Figura 3, obtendo-se o valor de Hm.

### 2.2.3 Determinação da resistividade aparente do solo ( $\rho_a$ )

Inicialmente é necessário calcular o valor da incógnita K2 pela Equação (4):

$$K_2 = \frac{r}{H_m} \quad (4)$$

Em que:  $r$  = raio do círculo equivalente à área da malha de aterramento, dado pela Equação (5) se corresponder a áreas retangulares.

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (5)$$

Nessa equação  $S$  é a área da malha de aterramento em  $m^2$ . Para sistemas de aterramento utilizando-se eletrodos verticais, o valor de  $r$  é dado pela Equação (6).

$$r = \frac{(N - 1) \cdot De}{2} \quad (6)$$

Em que:  $N$  = número de eletrodos verticais;  $De$  = distância entre os eletrodos (m). Dessa forma, com os valores de  $p_2/p_1$  e  $K_2$  a Tabela 5 é utilizada para determinar o valor de  $K_3$ .

Tabela 5 – Fator  $K_3$  para o solo de duas camadas

K2	Relação $p_2/p_1$												
	0,01	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200
	K3												
0,1	1	1,01	1,01	1,02	1,05	1	1,1	1,15	1,18	1,2	1,2	1,3	1,3
0,2	0,95	0,96	1	0,97	0,99	1	1,13	1,2	1,25	1,3	1,4	1,4	1,5
0,5	0,8	0,9	0,98	0,95	1	1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2	2,3
1	0,77	0,83	0,9	0,85	0,9	1	1,3	1,5	1,6	2	2,5	2,8	3
2	0,67	0,82	0,86	0,86	0,9	1	1,31	1,55	1,6	2,6	3,2	4	4,5
5	0,56	0,6	0,65	0,68	0,8	1	1,32	2	2,9	4	5,7	7,3	8,8
10	0,48	0,52	0,6	0,6	0,8	1	1,35	2,4	3,5	5,3	8	11	14
20	0,41	0,45	0,5	0,53	0,72	1	1,4	2,7	4,2	6,8	12	15	21
35	0,36	0,4	0,45	0,5	0,71	1	1,4	2,8	4,8	7,8	14	18	27
50	0,32	0,37	0,4	0,48	0,7	1	1,5	3,1	5,4	8,5	16	23	33
75	0,29	0,35	0,38	0,46	0,68	1	1,5	3,1	5,5	9	17	26	40
100	0,27	0,31	0,35	0,42	0,55	1	1,5	3,2	5,8	9,8	18	39	45
200	0,22	0,26	0,3	0,38	0,6	1	1,6	3,5	6	11	22	35	56
500	0,18	0,21	0,25	0,35	0,6	1	1,7	3,7	6,7	12	25	42	77
1000	0,15	0,17	0,22	0,3	0,6	1	1,8	4	7	13	37	48	85

Fonte: Mamade Filho (2016)

Por fim, a partir da Equação (7) determina-se o valor da resistividade aparente  $\rho_a$  dada em  $\Omega.m$ .

$$\rho_a = K_3 \cdot \rho_1 \quad (7)$$

### 2.3 Estabelecimento de uma geometria básica de malha

A primeira etapa no dimensionamento de uma malha de aterramento envolve a escolha de uma geometria inicial, que deve considerar os limites da área do terreno a ser coberto pela malha e o posicionamento preliminar dos condutores, quando necessário pode ser complementado com hastes verticais. Essa área deve abranger toda a residência. Após a definição da área a ser coberta, é necessário estabelecer uma configuração inicial para a instalação dos eletrodos que farão parte da malha. A escolha dessa geometria deve considerar a disposição dos equipamentos dentro da área, além do modelo de estratificação do solo, que já deve ter sido previamente analisado.

A NBR 15751 que trata de sistemas de aterramento de subestações recomenda que a malha de aterramento esteja enterrada a uma profundidade mínima de 0,5 metros para as subestações. Porém a NBR 5410 que trata de instalações elétricas de baixa tensão recomenda que a malha esteja enterrada no nível das fundações. Portanto, cabe ao projetista analisar qual a melhor profundidade em que a malha será enterrada.

#### 2.3.1 Cálculo preliminar da resistência de aterramento

Inicialmente recomenda-se realizar uma estimativa preliminar da resistência de aterramento da malha antes de definir sua geometria final. Essa estimativa pode ser feita considerando que a resistência de aterramento depende basicamente da área coberta pela malha e da resistividade do solo. O valor de resistência desejado é normalmente menor que 10  $\Omega$ , mesmo que a norma não determine nenhum valor. Dessa forma, a resistência preliminar é dada pela Equação (8).

$$R = \frac{\rho_a}{4r} \quad (8)$$

Em que: R = Resistência de aterramento ( $\Omega$ );  $\rho_a$  = Resistividade aparente do solo ( $\Omega.m$ ) e r = raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento (m).

Com base na geometria inicial da malha, é possível estimar o comprimento total dos condutores a serem enterrados somando-se os comprimentos dos eletrodos horizontais

previstos. Esse valor permite o cálculo aproximado da resistência de aterramento por meio das Equações (9) e (10) apresentadas a seguir.

- Para malhas enterradas a uma profundidade de até 0,25m

$$R = \frac{\rho_a}{4r} + \frac{\rho_a}{L_t} \quad (9)$$

- Para malha enterradas a uma profundidade entre 0,25m e 2,5m

$$R = \rho_a \left\{ \left( \frac{1}{L_t} \right) + \left( \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \right) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{1}{1 + H \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

Em que: R = Resistência de aterramento ( $\Omega$ );  $\rho_a$  = resistividade aparente do solo ( $\Omega \cdot m$ ); A = área ocupada pela malha ( $m^2$ );  $L_t$  = comprimento total dos condutores (m); H = profundidade da malha (m); r = raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento (m). As Equações (8), (9) e (10) são conservativas no caso de malhas contendo hastes verticais.

### 2.3.2 Equação de Dwight

Segundo Dwight, para um caso específico em que o aterramento é feito apenas por uma única haste, a resistência de aterramento pode ser dada pela Equação (11).

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \left\{ \left( \ln \frac{4 \cdot L}{d} \right) - 1 \right\} \quad (11)$$

## 2.4 Dimensionamento do condutor da malha

O dimensionamento do condutor da malha de aterramento leva em conta os esforços mecânicos como compressão, tração e cisalhamento e esforços térmicos provocados pelas correntes elétricas que ele poderá conduzir.

### 2.4.1 Dimensionamento mecânico

Levando em conta a necessidade de resistir aos esforços mecânicos e eletromagnéticos, a norma NBR 15751 estabelece que os condutores utilizados na malha de aterramento devem ter, no mínimo, seção transversal de 50 mm<sup>2</sup> para cobre e 38 mm<sup>2</sup> para aço protegido contra corrosão de acordo com normas aplicáveis.

### 2.4.2 Dimensionamento térmico

O condutor precisa ter uma seção dimensionada para suportar a passagem de uma corrente máxima por um determinado período, durante o qual a temperatura pode ultrapassar um limite máximo tolerável, partindo de uma temperatura ambiente. Considera-se que, devido à curta duração da corrente de curto-circuito, toda a energia térmica gerada permanece no interior do condutor. A equação de Onderdonk, que permite o cálculo desta seção, é dada pela Equação 12.

$$S = I_f \cdot \sqrt{\frac{t \cdot \alpha_r \cdot \rho_r \cdot 10^4}{TCAP \cdot \ln \frac{(K_0 + T_m)}{(K_0 + T_a)}}} \quad (12)$$

Em que: S = Seção mínima do condutor (mm<sup>2</sup>); I<sub>f</sub> = Corrente de falta fase-terra (kA); t = Tempo total de acionamento da proteção (s); α<sub>r</sub> = Coeficiente térmico de resistividade do condutor a uma dada temperatura (°C<sup>-1</sup>); ρ<sub>r</sub> = Resistividade do condutor de aterramento a uma dada temperatura (Ω.cm); TCAP = Fator de capacidade térmica [J/(cm<sup>3</sup> x °C)]; K<sub>0</sub> = Coeficiente térmico da resistividade do condutor a 0 °C (1/α<sub>0</sub>); T<sub>m</sub> = Temperatura máxima suportável (°C); T<sub>a</sub> = Temperatura ambiente (°C).

A Tabela 6 mostra os valores dos parâmetros mencionados anteriormente para os principais tipos de condutores utilizados em malhas de aterramento.

Tabela 6 - Valores dos parâmetros para os tipos de condutores mais utilizados em malhas

Tipo do condutor	Condutância (%)	Coeficiente térmico de resistividade		Temperatura de fusão (°C)	Resistividade ρ <sub>r</sub> (20 °C)	TCAP [J/(cm <sup>3</sup> x °C)]
		α <sub>0</sub> (0 °C)	α <sub>r</sub> (20 °C)			
Cobre (macio)	100	0,00427	0,00393	1083	1,724	3,422
Cobre (duro)	97	0,00413	0,00381	1084	1,777	3,422
Aço cobreado 40%	40	0,00408	0,00378	1084	4,397	3,846
Aço cobreado 30%	30	0,00408	0,00378	1084	5,862	3,846
Haste de aço cobreado	20	0,00408	0,00378	1084	8,62	3,846
Fio de alumínio	61	0,00439	0,00403	657	2,862	2,556
Liga de alumínio 5005	53,5	0,0038	0,00353	660	3,222	2,598
Liga de alumínio 6201	52,5	0,00373	0,00347	660	3,284	2,598

Aço-alumínio	20,3	0,00388	0,0036	660	8,48	2,67
Aço 1020	10,8	0,00165	0,0016	1510	15,9	3,28
Haste de aço	9,8	0,00165	0,0016	1400	17,5	4,44
Aço zincado	8,5	0,00341	0,0032	419	20,1	3,931
Aço inoxidável 304	2,4	0,001 34	0,001 30	1 400	72	4,032

Fonte: NBR 15751

### 2.4.3 Conexões

As conexões são utilizadas para unir os condutores, podendo ser de diferentes tipos como mecânica (aparafusada ou por pressão), emenda tipo solda oxiacetilênica, emenda com solda exotérmica ou emenda à compressão, cada uma com propriedades diferentes. Logo, se a temperatura máxima que a conexão puder suportar for menor do que a temperatura máxima permitida para o condutor, é necessário, por questão de segurança, adotar como limite a temperatura máxima correspondente ao tipo de conexão utilizada. Nesse sentido, a Tabela 7 determina o valor de  $T_m$  para os diferentes tipos de conexões.

Tabela 7 – Temperatura máxima de diferentes conexões

Conexão	$T_m$ (°C)
Mecânica (aparafusada ou por pressão)	250
Emenda tipo solda oxiacetilênica	450
Emenda com solda exotérmica	850
Emenda à compressão	850

Fonte: NBR 15751

Nesse sentido, a Equação (12) deverá ser substituída pela Equação (13).

$$S = I_f \cdot K_f \cdot \sqrt{t} \quad (13)$$

Em que: S = Seção mínima do condutor (mm<sup>2</sup>);  $I_f$  = Corrente de falta fase-terra (kA);  $K_f$  = Constante para materiais considerando temperatura ambiente de 40 °C e t = Tempo total de acionamento da proteção (s).

A Tabela 8 exemplifica o  $K_f$  para o cobre, considerando o limite de fusão da conexão.

Tabela 8 – Valores de  $K_f$  para o cobre

Conexão	$K_f$
Mecânica (aparafusada ou por pressão)	5,8
Emenda tipo solda oxiacetilênica	4,7

Emenda com solda exotérmica	3,8
Emenda à compressão	3,8

Fonte: NBR 15751

Caso a seção do condutor calculada pelas Equações (12) ou (13) resulte em um valor inferior ao estabelecido em 2.4.1, deve ser utilizada a seção mínima estabelecida.

## 2.5 Cálculo das tensões permissíveis

O tipo de acidente elétrico mais frequente envolvendo pessoas é o contato acidental com partes metálicas que estão energizadas. Nessa situação, o corpo da pessoa acaba formando um caminho condutor entre a fase e a terra. Outro tipo de ocorrência é o chamado contato indireto, que acontece quando alguém entra em contato com uma parte condutiva do sistema elétrico (massa) que, devido a uma falha de isolamento, passou a estar sob tensão elétrica, expondo o indivíduo a um potencial elétrico.

Para que um sistema de aterramento seja considerado seguro em qualquer situação de falha, é fundamental definir os limites máximos aceitáveis para as tensões de passo e de toque. Esses valores são determinados com base no tempo necessário para a eliminação do defeito e na resistividade da camada superficial do solo. O tempo deve ser definido de forma conservadora, considerando a filosofia de proteção adotada e as características dos dispositivos de proteção utilizados. É necessário avaliar duas situações distintas, uma que envolve defeitos cuja duração é limitada pela atuação do sistema de proteção gerando uma corrente de choque de curta duração, e outra que se refere a falhas prolongadas que não acionam os dispositivos de proteção, o que gera uma corrente de choque de longa duração.

### 2.5.1 Corrente de choque de longa duração ( $I_{chld}$ )

Trata-se da corrente de choque gerada por uma tensão de toque ou de passo, resultante de uma falha elétrica de longa duração. A corrente de choque de longa duração permissível corresponde ao valor máximo que ela pode atravessar o corpo humano sem causar fibrilação cardíaca. Os limites superiores dessa corrente, correspondentes ao que 99,5% da população suporta, são de 9 mA para homens e 6 mA para mulheres, segundo a NBR 15751.

### 2.5.2 Corrente de choque de curta duração ( $I_{chcd}$ )

Corresponde ao valor máximo de corrente que não provoca fibrilação cardíaca em 99,5% das pessoas com peso de 50 kg, considerando um intervalo de tempo entre 0,03 e 3 segundos. O valor dessa corrente é determinado pela Equação (14).

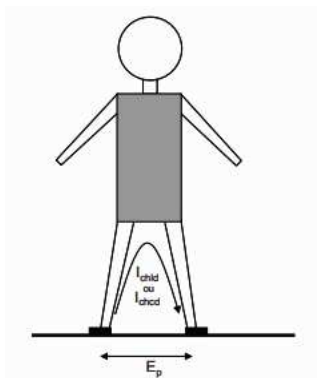
$$I_{chcd} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (14)$$

O valor de  $t$ , que representa a duração do choque elétrico (s), é definido com base no tempo máximo de eliminação da falha de acordo com o funcionamento do dispositivo de proteção. Caso houver religamento automático com intervalo de tempo igual ou inferior a 0,5 segundos, deve-se considerar como tempo total a soma do tempo da falta inicial com os tempos das faltas subsequentes. Porém, se o tempo de religamento for maior que 0,5 segundos deve-se utilizar o maior tempo de falta.

### 2.5.3 Tensão de passo

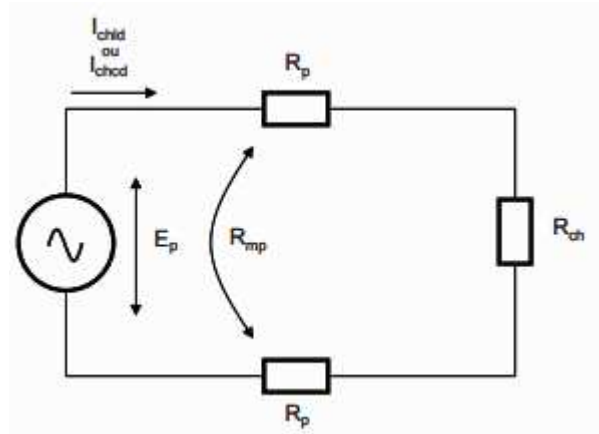
Quando uma pessoa está dentro de uma malha de aterramento e, nesse momento, uma corrente de defeito está fluindo por ela, o indivíduo fica exposto a uma tensão entre os pés. Essa situação é ilustrada na Figura 4 (a), enquanto a Figura 4 (b) apresenta o circuito elétrico equivalente a essa condição.

Figura 4 (a) – Tensão de passo



Fonte: NBR 15751

Figura 4 (b) – Circuito elétrico equivalente



Fonte: NBR 15751

Em que:  $E_p$  = Tensão de passo (V),  $R_{ch}$  = Resistência do corpo humano ( $\Omega$ ),  $R_p$  = Resistência própria de cada pé ( $\Omega$ ),  $R_{mp}$  = Resistência mútua entre os pés ( $\Omega$ ),  $I_{chcd}$  = Máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano (A) e  $I_{chld}$  = Máxima corrente de longa duração admissível pelo corpo humano (A).

Nesse sentido, a máxima tensão de passo permissível pelo corpo humano é dada pelas Equações (15) e (16) para correntes de curta duração e longa duração respectivamente.

$$E_{pcd} = [R_{ch} + 2 \cdot (R_p - R_{mp})] \cdot I_{chcd} \quad (15)$$

$$E_{pld} = [R_{ch} + 2 \cdot (R_p - R_{mp})] \cdot I_{chld} \quad (16)$$

As resistências própria e mútua dos pés são dadas respectivamente pelas Equações (17) e (18).

$$R_p = \left(\frac{\rho_s}{4b}\right) \cdot C \quad (17)$$

$$R_{mp} = \left(\frac{\rho_s}{2 \cdot \pi \cdot R_p}\right) \quad (18)$$

Em que:  $\rho_s$  = Resistividade do revestimento da superfície do solo ( $\Omega \cdot m$ ), caso não haja revestimento, deve-se utilizar a resistividade da camada superficial do solo;  $b$  = Modelo estabelecido para o pé humano (0,083 m) e  $C$  = Fator de redução que depende da espessura da camada de revestimento.

O fator de redução  $C$  pode ser calculado pela Equação (19) ou de maneira simplificada pela Equação (20).

$$C = \frac{1}{0,96} \cdot \left[ 1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{K^{2n}} \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot n \cdot h_s}{0,08}\right)^2} \right] \quad (19)$$

$$C \cong 1 - \alpha \cdot \left[ \frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}}{2 \cdot h_s + \alpha} \right] \quad (20)$$

O valor de  $\alpha$  é igual a 0,106 m, enquanto o valor de  $K$  é dado pela Equação 21.

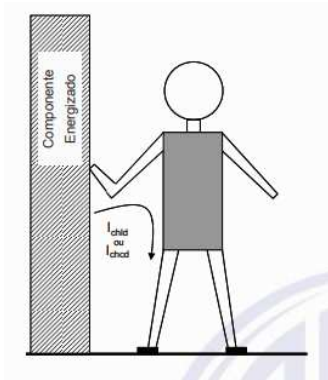
$$K = \frac{\rho_1 - \rho_s}{\rho_1 + \rho_s} \quad (21)$$

Em que:  $\rho_1$  = Resistividade da 1ª camada ( $\Omega \cdot m$ ) e  $\rho_s$  = Resistividade da camada de revestimento superficial ( $\Omega \cdot m$ ).

#### 2.5.4 Tensão de toque

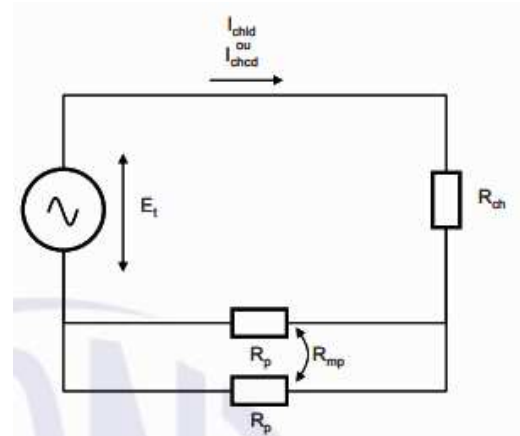
A tensão de toque trata-se da tensão à qual o corpo humano fica exposto ao tocar acidentalmente em partes metálicas (massas) que estejam energizadas de forma não intencional, fazendo com que uma corrente elétrica trafegue através do corpo humano. A altura de toque de uma pessoa é considerada igual a 1 m. A Figura 5 (a) ilustra a situação de uma pessoa submetida a tensão de toque, enquanto a Figura 5 (b) apresenta o respectivo circuito elétrico equivalente a essa condição.

Figura 5 (a) – Tensão de toque



Fonte: NBR 15751

Figura 5 (b) – Circuito elétrico equivalente



Fonte: NBR 15751

Nesse sentido, a máxima tensão de toque permitível pelo corpo humano, sem que ele sofra fibrilação ventricular, é dada pelas Equações (22) e (23) para correntes de curta duração e pelas Equações (24) e (25) para correntes de longa duração.

$$E_{tcd} = R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \cdot I_{chcd} \quad (22)$$

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1,5 \cdot \rho_s \cdot C) \cdot I_{chcd} \quad (23)$$

$$E_{tld} = R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \cdot I_{chld} \quad (24)$$

$$E_{tld} = (R_{ch} + 1,5 \cdot \rho_s \cdot C) \cdot I_{chld} \quad (25)$$

Em que:  $E_{tcd}$  = Tensão de toque para corrente de choque de curta duração (V);  $E_{tld}$  = Tensão de toque para corrente de choque de longa duração (V);  $R_{ch}$  = Resistência do corpo humano ( $\Omega$ );  $R_p$  = Resistência própria de cada pé ( $\Omega$ );  $R_{mp}$  = Resistência mútua entre os pés ( $\Omega$ );  $I_{chcd}$  = Máxima corrente de curta duração admissível (A);  $I_{chld}$  = Máxima corrente de longa duração admissível (A);  $\rho_s$  = Resistividade da camada de recobrimento da superfície do solo ( $\Omega \cdot m$ ) e  $C$  = Fator de redução.

## 2.6 Equações simplificadas de potenciais no solo

O cálculo das tensões de toque e de passo dentro da malha de aterramento pode ser feito utilizando equações simplificadas que estão presentes no anexo D da norma americana IEEE-80.

### 2.6.1 Equação simplificada relacionada à tensão de toque

A Equação (26) apresenta uma forma simplificada para o cálculo da tensão de toque dentro da malha de aterramento.

$$V_t = \frac{\rho \times I_m \times K_m \times K_i}{L_t} \quad (26)$$

Em que:  $V_t$  = Tensão de toque (V);  $\rho$  = Resistividade do solo ( $\Omega \cdot m$ );  $I_m$  = Corrente de falta que escoar para a malha (A);  $K_m$  = Fator geométrico da malha de aterramento, dado pela Equação (27);  $K_i$  = Fator de correção dado pela Equação (27);  $L_t$  = comprimento total dos condutores enterrados (m).

$$K_m = \frac{1}{2 \times \pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16 \times H \times d} + \frac{(D + 2 \times H)^2}{8 \times D \times d} - \frac{H}{4 \times d} \right) + \frac{K_{ii}}{\sqrt{1 + H}} \times \ln \left( \frac{8}{\pi(2n - 1)} \right) \right] \quad (27)$$

Em que:  $D$  = Distância entre os condutores paralelos (m);  $H$  = Profundidade em que a malha está enterrada (m);  $d$  = Diâmetro dos condutores que compõem a malha (m);  $n$  = Número de condutores paralelos em uma determinada direção;  $k_{ii}$  = Fator de correção dado pela Equação (28) para os casos em que a malha de aterramento não possui nenhuma haste de aterramento ou para o caso em que possui apenas algumas, nenhuma delas localizadas nos cantos ou na parte mais externa da malha.

$$k_{ii} = \frac{1}{(2 \times n)^{\frac{2}{n}}} \quad (28)$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times n \quad (29)$$

Em que:  $n$  = fator baseado na geometria da malha dado pela Equação (30).

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (30)$$

$$n_a = \frac{2 \times L_c}{L_p}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \times \sqrt{A}}}$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{\frac{0,7 \times A}{L_x \times L_y}}$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

Em que:  $L_c$  = Comprimento total dos condutores na horizontal (m);  $L_p$  = Perímetro da malha (m);  $A$  = Área da malha (m<sup>2</sup>);  $L_x$  = Máximo comprimento da malha na direção x (m);  $L_y$  = Máximo comprimento da malha na direção y (m);  $D_m$  = Máxima distância entre dois pontos da malha (m);  $n_b = 1$  (para malhas quadradas);  $n_c = 1$  (para malhas quadradas e retangulares) e  $n_d = 1$  (para malhas quadradas, retangulares e em formato de L).

### 2.6.2 Equação simplificada relacionada à tensão de passo

A Equação (31) apresenta uma forma simplificada para o cálculo da tensão de passo dentro da malha de aterramento.

$$V_p = \frac{\rho \times I_m \times K_s \times K_i}{L_t} \quad (31)$$

Em que:  $V_p$  = Tensão de passo (V);  $\rho$  = Resistividade do solo ( $\Omega \times m$ );  $I_m$  = Corrente de falta que escoar para a malha (A);  $K_s$  = Fator geométrico da malha de aterramento, dado pela Equação (32);  $K_i$  = Fator de correção, dado pela Equação (29);  $L_t$  = Comprimento total dos condutores enterrados (m).

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 \times H} + \frac{1}{D + H} + \frac{1}{D} \times (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (32)$$

Em que:  $D$  = Distância entre os condutores paralelos (m);  $H$  = Profundidade em que a malha está enterrada (m);  $n$  = Número de condutores paralelos em uma determinada direção.

## 2.7 Cálculo da corrente de malha

Quando ocorre uma falta de curta duração para a terra, a corrente de defeito ( $I_f$ ) é inicialmente conduzida para a malha de aterramento, sendo então distribuída por todo o sistema interligado. Cada parte desse sistema passa a desempenhar o papel de conduzir uma parte dessa corrente de falta. A corrente de malha ( $I_m$ ) corresponde à porção da corrente de defeito que efetivamente flui para o solo por meio da malha de aterramento.

Caso, no dimensionamento da malha de aterramento, for considerada a corrente total de falta ( $I_f$ ) em vez da corrente específica da malha ( $I_m$ ), o resultado será uma malha superdimensionada. Da mesma forma, se for usada a corrente de suportabilidade dos equipamentos como base para o cálculo, também ocorrerá um superdimensionamento. Esse tipo de superdimensionamento não ocorre quando a corrente de malha é igual à corrente de falta ( $I_m = I_f$ ), o que é comum em sistemas de transmissão que não utilizam condutor para-raios ou em redes de distribuição que não possuem cabo neutro ligado à malha.

### 2.7.1 Corrente de malha simétrica eficaz

Quando a corrente de malha não é igual à corrente de falta, é necessário calcular o valor da corrente de malha eficaz. Para isso, o sistema precisa ser representado por um circuito equivalente apropriado, levando em conta que o solo atua como um dos caminhos de retorno da corrente de falta. Em determinadas situações, quando a configuração da rede é bastante simples ou quando a impedância mútua pode ser considerada insignificante em relação à impedância própria, pode ser mais prático calcular inicialmente o fator de distribuição ( $S_f$ ) dado pela Equação (33) e, com base nele, determinar a corrente de malha.

$$S_f = \frac{I_{malha\ sim\ ef}}{I_{falta}} \quad (33)$$

Em que:  $S_f$  = Fator de distribuição;  $I_{malha\ sim\ ef}$  = Corrente de falta que escoar para a terra através da malha (A);  $I_{falta}$  = Corrente de falta na residência (A).

### 2.7.2 Corrente de falta

É fundamental considerar a corrente de malha de longa duração ( $I_{mld}$ ) no processo de dimensionamento de uma malha de aterramento. O primeiro passo é determinar o valor máximo da corrente que pode circular de forma contínua pelo neutro de um ou mais dispositivo da residência. Após isso, também é necessário identificar a parte dessa corrente que será escoada pela malha de aterramento da casa.

### 2.7.3 Fator de decremento $D_f$

O fator de decremento permite calcular o valor eficaz equivalente da corrente de falta assimétrica para um determinado tempo de eliminação da falta, levando em consideração o efeito da componente contínua. Este fator pode ser obtido por meio da Equação (34). Seu valor é inversamente proporcional ao tempo de eliminação da falta. Para tempos de eliminação geralmente iguais ou superiores a 0,5 segundos, é recomendado considerar o fator  $D_f$  igual a 1.

$$D_f = \sqrt{1 + \left(\frac{T_a}{t_f}\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)} \quad (34)$$

Em que:  $D_f$  = Fator de decremento;  $T_a$  = Constante de tempo do deslocamento da componente contínua (s) e  $t_f$  = Duração da falta (s).

### 2.7.4 Fator de projeção $C_p$

O fator de projeção ( $C_p$ ) atua como um parâmetro de correção que considera possíveis ampliações futuras da instalação em análise, levando em consideração o aumento da corrente de falta ao longo de sua vida útil. Em relação a esse fator, é aconselhável que os estudos de aterramento sejam realizados com base nos níveis de corrente de falta estimados até o ano horizonte definido no planejamento. Além disso, recomenda-se que o estudo seja reavaliado sempre que ocorrerem mudanças significativas nas condições originalmente analisadas.

### 2.7.5 Corrente de malha

Levando em conta todas as equações e definições apresentadas anteriormente, a corrente de malha pode ser determinada por meio das Equações (35) ou (36).

$$I_{malha} = I_{malha \text{ sim } ef} \cdot D_f \cdot C_p \quad (35)$$

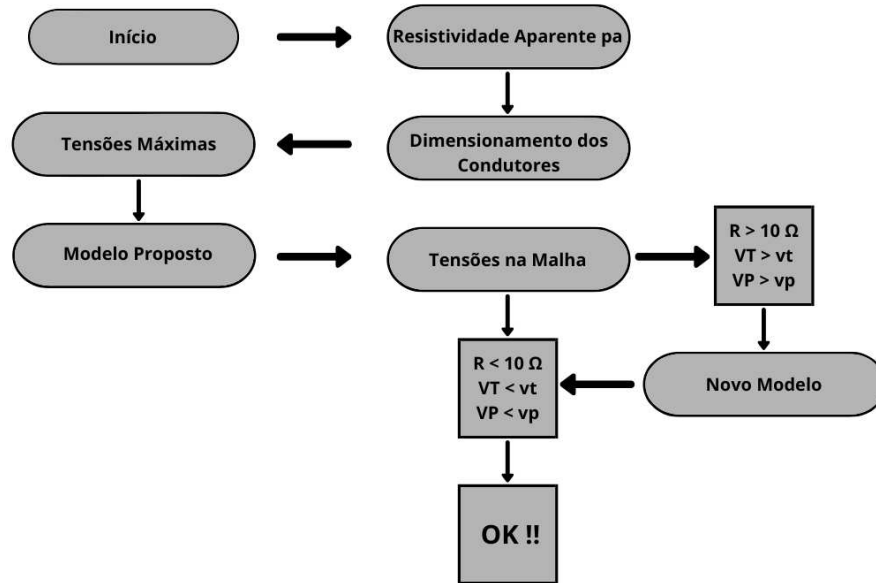
$$I_{malha} = I_{falta} \cdot S_f \cdot C_p \cdot D_f \quad (36)$$

Em que:  $I_{malha}$  = Corrente de malha (A);  $I_{malha \text{ sim } ef}$  = Corrente de falta que escoar para a terra através da malha de aterramento (A);  $I_{falta}$  = Corrente de falta (A);  $D_f$  = Fator de decremento;  $C_p$  = Fator de projeção e  $S_f$  = Fator de distribuição.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Nessa seção serão apresentados os métodos, técnicas e procedimentos utilizados para alcançar os objetivos gerais e específicos deste trabalho. O fluxograma de trabalho para o dimensionamento da malha de aterramento é apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma



Fonte: Autor (2026)

#### 3.1 Resistividade aparente do solo

O fator crucial no dimensionamento de qualquer sistema de aterramento é a resistividade aparente do solo. Logo, o primeiro passo para dimensionar a malha de aterramento é determinar o valor deste parâmetro. Nesse sentido, é necessário realizar uma sondagem elétrica vertical (SEV) utilizando o arranjo de Wenner, com o auxílio de um terrômetro, seguindo as determinações especificadas no item 2.2 deste presente estudo. Para que o dimensionamento seja realizado para o pior cenário, é necessário que essa sondagem seja realizada com o terreno seco e em épocas de pouca incidência de chuva.

#### 3.2 Dimensionamento dos condutores

Em posse do valor da corrente de curto-circuito máximo é possível dimensionar os condutores da malha de aterramento. Nesta seção são determinados os tamanhos da seção e do

comprimento dos condutores, além de determinar também os tipos e modelos, como cobre, aço, haste ou cantoneira. Esse dimensionamento é feito para atender os critérios mecânico e térmico segundo a NBR 15751.

### **3.3 Cálculo dos potenciais máximos permitidos**

Nessa etapa são definidas as tensões máximas de toque e de passo que o corpo humano é capaz de suportar. Esses potenciais dependem de alguns fatores, como a espessura e a resistividade da camada de solo, dos valores de resistência do corpo humano e dos pés, e por fim dos valores de correntes de longa e curta duração.

### **3.4 Modelo inicial da malha de aterramento**

Na penúltima etapa do dimensionamento, será proposto um modelo inicial de malha de aterramento com a distribuição dos condutores horizontais e verticais, sempre da maneira mais simples possível.

### **3.5 Cálculo dos potenciais dentro da malha**

Após a definição do modelo de malha, serão calculados 3 fatores, a resistência de aterramento ( $R$ ), que deverá ter um valor menor que  $10 \Omega$ , e as tensões de toque ( $V_t$ ) e de passo ( $V_p$ ) presentes na malha de aterramento, que deverão possuir um valor menor que os valores cálculos em 3.3. Caso um desses 3 fatores não for atendido, será necessário propor um novo modelo e recalcular esses parâmetros.

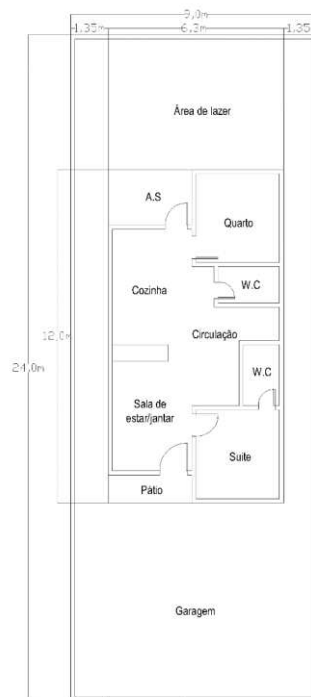
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Essa seção busca apresentar os resultados obtidos. Portanto, para se obter um diagnóstico mais preciso, foi feito um estudo de caso considerando os loteamentos e padrões de casas presentes na cidade de Crateús, e com esse estudo foi realizado um dimensionamento da malha de aterramento.

### 4.1 Estudo de caso

A cidade de Crateús é uma cidade pequena localizada no Ceará, com 76390 pessoas segundo o IBGE, suas principais atividades econômicas são comerciais, agropecuárias e em prestações de serviços. Logo, com base nessas características, a população de Crateús costuma habitar casas de pequeno porte e com terrenos delimitados pelos loteamentos comumente vendidos na cidade. Nesse sentido, para o estudo de caso realizado nesse trabalho foi considerado como casa padrão para o município de Crateús uma residência de baixo padrão, com terreno de 24 metros de comprimento e 9 metros de largura. A planta baixa dessa residência está presente na Figura 7.

Figura 7 – Planta baixa da casa padrão de Crateús



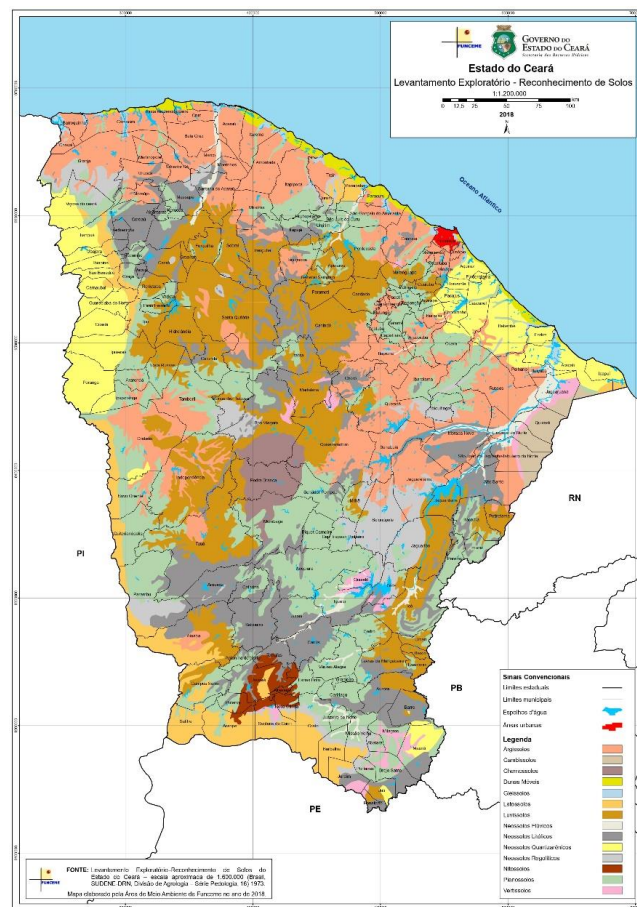
Fonte: Autor (2026)

## 4.2 Considerações iniciais

A circunferência da casa apresentada no item 4.1 possui um comprimento de 12 m e uma largura de 6,3 m. Logo, conforme a norma recomenda, a malha deverá estar distante da parede da residência em pelo menos um metro. Portanto, a malha deverá ter um comprimento de 14 m e uma largura de 8,3 m. Presumindo um circuito de distribuição monofásico de 220V, a corrente de falta considerada para este trabalho foi de 3 KA ou 3000 A.

A Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) é uma fundação vinculada ao governo do estado do Ceará, responsável por estudos e pesquisas sobre meteorologia, recursos hídricos e meio ambiente. A área de meio ambiente da FUNCEME elaborou um mapa do Ceará que expõe os tipos de solos presentes em cada região. De acordo com esse mapa, presente na Figura 8, o tipo de solo mais presente na região de Crateús é o argissolo.

Figura 8 – Mapa de solos do Ceará



Fonte: FUNCEME (2018)

A Tabela 1 expõe os valores de 5 tipos de argila, com resistividades muito diferentes. Logo, deve-se utilizar uma maneira alternativa para determinar qual o tipo de argila que compõe o solo de Crateús. Dessa forma, foi realizado uma medição da resistência do aterramento utilizado em 3 transformadores diferentes, presentes nos loteamentos Cidade Universitária Leste e Porto Seguro II, com o intuito de utilizar a equação determinada por Dwigth para determinar de maneira aproximada o valor de resistividade do solo.

#### 4.3 Determinação aproximada da resistividade do solo

A melhor maneira para determinar a resistividade elétrica do solo, como já foi citado no tópico 2.1.1 deste trabalho, é realizando o método de Wenner. Porém, o terrômetro, do tipo MTR 1530 – Minipa, disponibilizado pela empresa Pro Energy para a realização desse método possui apenas 3 terminais, o que torna inviável a realização do método. O dispositivo utilizado está presente na Figura 9.

Figura 9 - Terrômetro disponibilizado pela empresa Pro Energy



Fonte: Autor (2026)

Ainda assim, o terrômetro utilizado é capaz de medir a resistência de aterramentos já realizados. Dessa forma, foi realizado uma medição da resistência do aterramento utilizado em 3 transformadores diferentes, presentes nos loteamentos Cidade Universitária Leste e Porto Seguro II, com o intuito de utilizar a equação determinada por Dwigth para encontrar de maneira aproximada o valor de resistividade do solo de Crateús.

### 4.3.1 Resistividade do solo 1

A primeira resistência de aterramento medida foi de um transformador de energia localizado no início do loteamento Cidade Universitária Leste. Para isso, o cabo verde foi conectado no aterramento do transformador e ao terminal de terra do terrômetro, o cabo amarelo foi conectado a uma haste de aterramento cravada a aproximadamente 5 metros da haste principal e ao terminal de potencial do terrômetro, já o cabo vermelho foi conectado a outra haste cravada a aproximadamente 10 metros da haste principal e ao terminal de corrente do terrômetro, ambas as hastes foram cravadas 40 cm no solo. Posteriormente, o terrômetro foi ligado na escala de 400  $\Omega$ , resultando em um valor de resistência do aterramento de 3,2  $\Omega$ .

A disposição das hastes nesse ensaio e o valor de resistência encontrado podem ser observados nas Figuras 10, 11, 12 e 13 a seguir.

Figura 10 - Disposição geral das hastes



Fonte: Autor (2026)

Figura 11 - Disposição do cabo amarelo



Fonte: Autor (2026)

Figura 12 - Disposição do cabo vermelho



Fonte: Autor (2026)

Figura 13 - Resistência medida



Fonte: Autor (2026)

A partir do valor de resistência de aterramento, utilizando a equação de Dwight manipulada, é possível determinar o valor da resistividade elétrica do solo de maneira aproximada. Isso é possível considerando que o aterramento do transformador foi feito utilizando uma única haste de aterramento de 2,4 m de comprimento e com diâmetro de 12 mm. Contudo, o cálculo para determinação da resistividade elétrica desse solo é dado pela equação a seguir.

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2,4 \cdot 3,2}{\ln\left(\frac{4 \cdot 2,4}{0,012}\right) - 1} = 8,5 \Omega.m$$

### 4.3.2 Resistividade do solo 2

A segunda resistência de aterramento foi medida em outro transformador de energia, dessa vez localizado no final do loteamento Cidade Universitária Leste. O procedimento para a realização do teste foi o mesmo do item anterior, mudando-se apenas a localização do solo. Contudo, o valor de resistência do aterramento do segundo teste foi de 3,4  $\Omega$ . A disposição das hastes nesse ensaio e o valor de resistência encontrado podem ser observados nas Figuras 14, 15 e 16 a seguir.

Figura 14 - Resistência medida (teste 2)



Fonte: Autor (2026)

Figura 15 - Disposição do cabo verde (teste 2)



Fonte: Autor (2026)

Figura 16 - Disposição do cabo amarelo (teste 2)



Fonte: Autor (2026)

A partir do valor de resistência de aterramento, utilizando a equação de Dwight manipulada e fazendo as mesmas considerações do item anterior, é possível calcular a resistividade elétrica do segundo solo.

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2,4 \cdot 3,4}{\ln\left(\frac{4 \cdot 2,4}{0,012}\right) - 1} = 9 \Omega \cdot m$$

### 4.3.3 Resistividade do solo 3

A terceira resistência de aterramento foi medida em um transformador de energia localizado no loteamento Porto Seguro II. O procedimento para a realização do teste foi o mesmo do item anterior, mudando-se apenas a localização do solo. Contudo, o valor de resistência do aterramento do terceiro teste foi de 2,6  $\Omega$ . A disposição das hastes nesse ensaio e o valor de resistência encontrado podem ser observados nas Figuras 17, 18 e 19 a seguir.

Figura 17 - Resistência medida (teste 3)



Fonte: Autor (2026)

Figura 18 - Disposição do cabo verde (teste 3)



Fonte: Autor (2026)

Figura 19 - Disposição do cabo vermelho (teste 3)



Fonte: Autor (2026)

A partir do valor de resistência de aterramento, utilizando a equação de Dwight manipulada e fazendo as mesmas considerações do item anterior, é possível calcular a resistividade elétrica do terceiro solo.

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2,4 \cdot 2,6}{\ln\left(\frac{4 \cdot 2,4}{0,012}\right) - 1} = 6,9 \Omega.m$$

Por fim, após calcular a resistividade elétrica de 3 solos, é realizado a média desses valores com o intuito de se obter, de maneira aproximada, um valor comum para a resistividade elétrica do solo de Crateús.

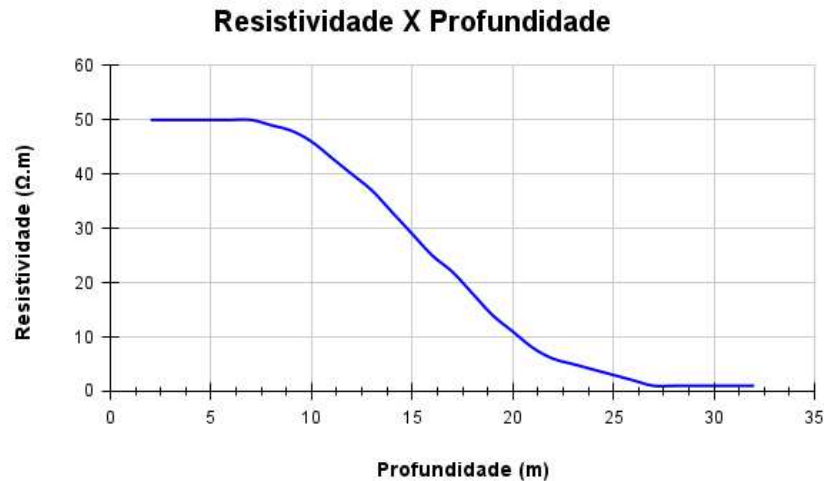
$$\rho = \frac{8,5 + 9 + 6,9}{3} = 8,1 \Omega.m$$

O ensaio foi realizado no dia 20/12, logo após um longo período de estiagem. Dessa forma, foi considerado que a umidade presente no solo era insignificante. Além disso, percebe-se que o valor médio de resistividade do solo permaneceu inferior a 50  $\Omega.m$ . Contudo, será considerado que o solo de Crateús se trata de uma argila plástica, com valores de resistividade elétrica entre 1 e 50  $\Omega.m$ .

Será considerada uma estratificação do solo em duas camadas conforme o item 2.2.1. Nesse sentido será adotada uma resistividade elétrica de 50  $\Omega.m$  para a primeira camada,

enquanto a segunda camada terá uma resistividade de 1  $\Omega.m$ . A curva de resistividade do solo é apresentada na Figura 20 a seguir.

Figura 20 – Curva de resistividade do solo



Autor: (2026)

Para determinar a profundidade da primeira camada é necessário calcular a resistividade média do solo, mas antes disso, o valor de  $k_1$  deve ser obtido através da Tabela 4 usando a relação de  $p_2/p_1$ .

$$\rho_m = 50 \cdot 0,6940 = 34,7 \Omega.m$$

Por fim, o valor de  $p_m$  é introduzido na curva de resistividade do solo encontrando-se um valor de 14 m para a profundidade da primeira camada. Será considerado uma camada de recobrimento do solo executada com concreto seco, o valor de resistividade considerado para o concreto é de 100  $K\Omega$ , e a malha deverá estar enterrada a uma profundidade de 0,6 m. Os condutores horizontais serão de cobre duro e as conexões de solda exotérmica. A corrente de falta terá a duração de 0,5 s.

O fator de projeção ( $C_p$ ) adotado foi de 1 considerando que não haverá nenhuma expansão da instalação elétrica. Como o tempo de eliminação de falta foi de 0,5 segundos, o fator de decremento ( $D_f$ ) será igual a 1. Por fim, o fator de distribuição considerado ( $S_f$ ) foi de 0,8. Dessa forma, a Tabela 9 resume todos os valores utilizados acima para os cálculos iniciais.

Tabela 9 – Variáveis iniciais

Variável	Valor	Variável	Valor
Comprimento	14 m	Kf	3,8
Largura	8,3 m	p1	50 $\Omega$ .m
If	3 KA	p2	1 $\Omega$ .m
Sf	0,8	ps	100 K $\Omega$ .m
Cp	1	hs	10 cm
Df	1	h	14 m
t	0,5 s	H	0,6 m

Fonte: Autor (2026)

### 4.3 Corrente de malha

Conforme exposto no item anterior a corrente de falta ( $I_f$ ) é de 3 KA, o fator de distribuição ( $S_f$ ) é de 0,8, e tanto o fator de decremento ( $D_f$ ) quanto o fator de projeção ( $C_p$ ) são unitários. Logo, a corrente de malha ( $I_m$ ) pode ser obtida utilizando a Equação (28).

$$I_m = 3000 \times 0,8 \times 1 \times 1 = 2,4 \text{ KA}$$

### 4.4 Resistividade aparente do solo

A resistividade aparente do solo ( $p_a$ ) só pode ser obtida depois do cálculo de três fatores, o raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento ( $r$ ), a incógnita K2 e a incógnita K3. Dessa forma, considerando que a malha será retangular com 14 metros de comprimento e 8,3 metros de largura,  $r$  pode ser obtido através da aplicação da Equação (5).

$$r = \sqrt{\frac{(14 \times 8,3)}{\pi}} = 6,1 \text{ m}$$

A incógnita K2 é obtida pela Equação (4) através da razão entre  $r$  e a espessura da primeira camada ( $h$ ).

$$K_2 = \frac{6,1}{14} \cong 0,5$$

Nesse sentido, com os valores de  $K_2$  e da divisão entre a resistividade elétrica da segunda e da primeira camada ( $p_2/p_1$ ), é possível determinar valor de  $K_3$  utilizando a Tabela (5). Logo, o valor de  $K_3$  é de 0,8. Contudo, utiliza-se a Equação (7) para determinar o valor da resistividade aparente  $p_a$ .

$$\rho_a = 0,8 \times 50 = 40 \Omega.m$$

#### 4.5 Cálculo preliminar da resistência de aterramento

Após a obtenção dos valores da resistividade elétrica aparente do solo ( $p_a$ ) e do raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento ( $r$ ), é possível estimar a resistência de aterramento da malha por meio da Equação (8).

$$R = \frac{40}{(4 \times 6,1)} = 1,6 \Omega$$

#### 4.6 Dimensionamento mecânico e térmico do condutor da malha

O dimensionamento do condutor da malha pode ser obtido por meio da Equação (12), visto que a constante  $K_f$  e o tempo de duração da corrente de falta ( $t$ ) estão presentes na Tabela 9. Porém, a corrente de falta utilizada será a corrente de malha ( $I_m$ ), no intuito de evitar um superdimensionamento para a seção do condutor.

$$S = 2,4 \times 3,8 \times \sqrt{0,5} = 6,4 \text{ mm}^2$$

Nesse sentido, de acordo com o que foi estabelecido no item 2.4.1, a seção transversal mínima para o cobre é maior que o valor calculado. Logo, o condutor que deve ser utilizado é o de seção transversal de 50 mm<sup>2</sup>.

#### 4.7 Cálculo das correntes de choque de longa e de curta duração

A corrente de choque de longa duração ( $I_{chld}$ ) máxima suportada pelos homens é de 9 mA e pelas mulheres é de 6 mA. Logo, o valor adotado para o dimensionamento da malha é de 6mA, visando garantir a segurança de todos, independentemente do sexo. No entanto, a corrente de choque de curta duração ( $I_{chcd}$ ) é admitida conforme a Equação (13).

$$I_{chcd} = \frac{0,116}{\sqrt{0,5}} \cong 164 \text{ mA}$$

#### 4.8 Tensões admissíveis

O cálculo das tensões de toque e de passo admissíveis só pode ser realizado depois da determinação de algumas variáveis, são elas a resistência própria de cada pé ( $R_p$ ), a resistência mútua entre os pés ( $R_{mp}$ ) e o fator de redução ( $C$ ). Inicialmente, o fator de redução é calculado conforme a Equação (19).

$$C \cong 1 - 0,106 \times \left[ \frac{1 - \frac{50}{100000}}{2 \times 0,1 + 0,106} \right] = 2,9$$

Em seguida, através da Equação (16), é calculado a resistência própria de cada pé.

$$R_p = \left( \frac{100000}{4 \times 0,083} \right) \times 2,9 \cong 873,5 \text{ K}\Omega$$

Dessa forma, é possível obter o valor da resistência mútua entre os pés por meio da Equação (17).

$$R_{mp} = \left( \frac{100000}{2 \times \pi \times 873500} \right) \cong 18 \text{ m}\Omega$$

Após a determinação dessas variáveis e com os valores da máxima corrente de curta duração admissível ( $I_{chcd}$ ) e da máxima corrente de longa duração admissível ( $I_{chld}$ ), é possível calcular as tensões de passo para curta duração ( $E_{pcd}$ ) e para longa duração ( $E_{pld}$ ), por meio das Equações (14) e (15) respectivamente.

$$E_{pcd} = [1000 + 2 \times (873500 - 0,018)] \times 0,164 \cong 286,7 \text{ KV}$$

$$E_{pld} = [1000 + 2 \times (873500 - 0,018)] \times 0,006 \cong 10,5 \text{ KV}$$

Nesse sentido, aplica-se as Equações (22) e (24) para o cálculo das tensões de toque de curta duração e de longa duração respectivamente.

$$E_{tcd} = (1000 + 1,5 \times 100000 \times 2,9) \times 0,164 = 71,5 \text{ KV}$$

$$E_{tld} = (1000 + 1,5 \times 100000 \times 2,9) \times 0,006 = 2,6 \text{ KV}$$

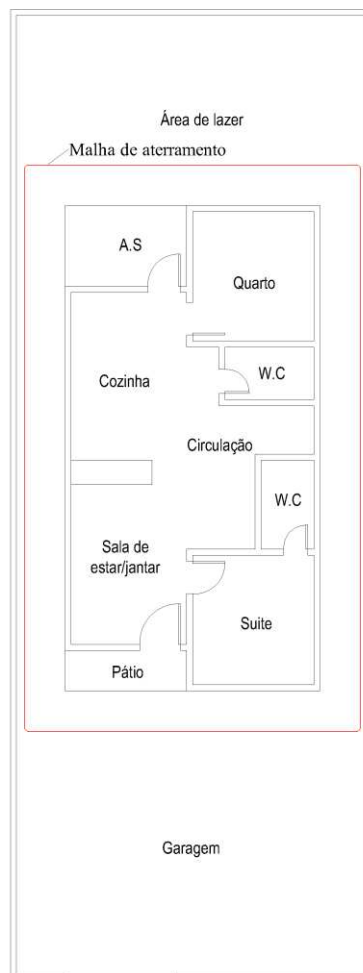
## 4.9 Dimensionamento da malha de aterramento

Esse tópico do trabalho apresenta a geometria da malha de aterramento e posteriormente os cálculos da resistência e das tensões de toque e de passo. Dessa forma, é possível comparar os valores obtidos com os valores admissíveis.

### 4.9.1 Modelo proposto

O modelo de malha escolhido foi um anel de cobre de 50 mm<sup>2</sup> enterrado a uma profundidade de 0,6 m com um comprimento de 14 m e largura de 8,3 m, sem nenhuma haste de aterramento. Esse modelo pode ser visualizado na Figura 21.

Figura 21 – Modelo proposto



Fonte: Autor (2026)

Dessa forma, com os valores da resistividade aparente do solo ( $\rho_a$ ), o comprimento total dos condutores enterrados ( $L_t$ ) de 44,6 m, a área ocupada pela malha (A) de 116,2 m<sup>2</sup> e sabendo

que a malha está enterrada a uma profundidade (H) de 0,6 m, é possível determinar a resistência da malha de aterramento (R), por meio da Equação (10).

$$R = 40 \times \left\{ \left( \frac{1}{44,6} \right) + \left( \frac{1}{\sqrt{20 \times 116,2}} \right) \times \left[ 1 + \left( \frac{1}{1 + 0,6 \times \sqrt{\frac{20}{116,2}}} \right) \right] \right\} = 2,4 \Omega$$

O segundo fator a ser calculado é a tensão de toque ( $V_t$ ), porém esse cálculo exige a determinação de outras duas variáveis,  $K_m$  e  $K_i$ . Dessa forma, é possível determinar o valor de  $K_m$  e  $K_i$  através da Equação (27) e Equação (29) respectivamente, utilizando os valores da distância dos condutores em paralelo (D) de 14 m, do diâmetro dos condutores horizontais (d) de 9 mm e do fator de coreção  $k_{ii}$  de 0,25.

$$K_m = \frac{1}{2 \times \pi} \left[ \ln \left( \frac{14^2}{16 \times 0,6 \times 0,009} + \frac{(14 + 2 \times 0,6)^2}{8 \times 14 \times 0,009} - \frac{0,6}{4 \times 0,009} \right) + \frac{0,25}{\sqrt{1 + 0,6}} \times \ln \left( \frac{8}{\pi \times (2 \times 2 - 1)} \right) \right] = 1,2$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times \frac{2 \times 44,6}{44,6} \times \sqrt{\frac{44,6}{4 \times \sqrt{116,2}}} = 0,95$$

Por fim, após o cálculo dessas variáveis, pode-se obter a tensão de toque ( $V_t$ ).

$$V_t = \frac{40 \times 2400 \times 1,2 \times 0,95}{44,6} = 2,5 \text{ KV}$$

Contudo, para determinar a tensão de passo, inicialmente deve-se obter o fator de correção  $K_s$ . Nesse caso, a separação entre os condutores paralelos (D) é de 14 m, e a malha está instalada a uma profundidade (H) de 0,6 m. Logo, através da Equação (32) o valor de  $K_s$  pode ser calculado.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \times \left[ \frac{1}{2 \times 0,6} + \frac{1}{14 + 0,6} + \frac{1}{14} \times (1 - 0,5^0) \right] = 0,29$$

Dessa forma, após se determinar o valor de  $K_s$ , torna-se possível determinar a tensão de passo utilizando a Equação (31) juntamente com os valores da resistividade aparente do solo ( $\rho_a$ ) de  $40 \Omega \cdot \text{m}$ , da corrente de malha ( $I_m$ ) de 2,4 kA e do comprimento total dos condutores horizontais ( $L_t$ ) de 44,6 m.

$$V_p = \frac{40 \times 2400 \times 0,29 \times 0,95}{44,6} = 593 \text{ V}$$

Contudo, entende-se que esse modelo de malha é o suficiente para atender os critérios de resistência de aterramento e de tensões de passo e de toque permissíveis, conforme é exposto na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de resistência e tensão

<b>Critério</b>	<b>Limite Tolerável</b>	<b>Calculado</b>
Resistência de aterramento (R)	10 $\Omega$	2,4 $\Omega$
Tensão de toque (Vt)	71,5 KV	2,5 KV
Tensão de passo (Vp)	286,7 KV	593 V

Fonte: Autor (2026)

## **5 CONCLUSÃO**

### **5.1 Conclusão geral**

O presente trabalho foi capaz de realizar o dimensionamento de uma malha de aterramento para uma residência típica no município de Crateús. Logo, o objetivo principal desse estudo foi alcançado. Nesse sentido, é importante destacar que o correto dimensionamento de um aterramento elétrico é fundamental para garantir a segurança das pessoas e dos bens interligados à residência.

As medições realizadas utilizando um terrômetro simples foram úteis para determinar de forma aproximada, utilizando a equação de Dwight, a resistividade elétrica do solo em que foi realizado o ensaio. Portanto, a média dos valores encontrados foi de 8,1  $\Omega$ .m. No entanto, esse valor foi utilizado apenas para definir qual o tipo de solo presente na região de Crateús e sua faixa de valores para a resistividade elétrica, tratando-se então de uma argila plástica com valores de resistividade entre 1  $\Omega$ .m e 50  $\Omega$ .m. Dessa forma, a partir da faixa de valores encontrada, foi traçado a curva de resistividade do solo e feito todo o dimensionamento da malha.

A geometria da malha de aterramento em forma de anel, utilizando um condutor de cobre nu de 50 mm<sup>2</sup> enterrado a uma profundidade de 0,6 m, foi o suficiente para garantir valores de resistência e de tensões de toque e de passo satisfatórios, visto que o valor de resistência encontrado foi de 2,4  $\Omega$ , um número inferior a 10  $\Omega$ . Enquanto isso, as tensões de toque e de passo encontradas foram de 2,5 KV e 593 V respectivamente. Esses valores são satisfatórios, pois as tensões de toque e de passo máximas são de 71,5 KV e 286,7 KV respectivamente.

Contudo, verifica-se que a malha é uma forma eficiente de se realizar o aterramento residencial na cidade de Crateús, pois os valores obtidos foram significativamente baixos. Além disso, é uma forma de eletrodo de aterramento recomendada pela NBR 05410.

### **5.2 Sugestão de trabalhos futuros**

A resistividade elétrica do solo é o fator principal para o dimensionamento do eletrodo de aterramento, independente da sua natureza. Logo, seria relevante realizar um estudo completo do solo de Crateús, utilizando um terrômetro com 4 terminais para realizar o método de Wenner em diferentes regiões da cidade, pois assim seria obtido um número mais próximo da realidade.

## REFERÊNCIAS

ARCANGELO (Bahia) (org.). **Geofísica para Projetos de Aterramento**. [S. l.], [2021]. Disponível em: <https://arcangeo.com.br/resistividade-solo/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). ABNT NBR 5410:2004, de 31 de março de 2005. **Instalações elétricas de baixa tensão**, Brasil, 30 set. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). ABNT NBR 7117:2020, de 27 de novembro de 2020. **Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos Parte 1: Medição da resistividade de modelagem geométrica**, Fortaleza, ano 2020, 27 nov. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). ABNT NBR 15751:2009, de 13 de setembro de 2009. **Sistemas de aterramento de subestações: Requisitos**, Brasil, ano 2009, p. 1-217.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (Brasil). Serviço Social da Indústria. **NR10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. [S. l.: s. n.], [2019]. 198 p.

COSTA, Paulo Fernandes; MORENO, Hilton. **Aterramento elétrico**. 2. ed. rev. [S. l.: s. n.], 2018. 53 p. *E-book* (53p.).

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). **Levantamento Exploratório: Reconhecimento de Solos**. [S. l.: s. n.], 2018. 1 atlas. Escala 1:1.200.000. Disponível em: [http://www.funceme.br/wp-content/uploads/2019/02/16-Mapa\\_CE\\_Solos\\_A2.pdf](http://www.funceme.br/wp-content/uploads/2019/02/16-Mapa_CE_Solos_A2.pdf). Acesso em: 4 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **População no último censo**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/crateus.html>. Acesso em: 12 fev. 2025.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (USA). IEEE 80:2013, de 11 de dezembro de 2013. **Guide For Safety in AC Substation Grounding**, New York, p. 1-224, 11 dez. 2013.

LEONARDO POWER QUALITY INITIATIVE (Europa). **Aterramento e CEM: Sistemas de Aterramento - Aspectos Construtivos Básico**. São Paulo: [s. n.], 2006. 16 p.

MATTOS, Marcos André. **Técnicas de Aterramento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Okime, 2014. 342 p.

MAMADE FILHO. **Instalações elétricas industriais**. 9. ed. Fortaleza: LTC, 2016. 1616 p.

SILVA, Jessica Oneda; LIMA, Marcelo Ricardo; TESTONI, Samara Alves. **Diferenciação textural – lessivagem, elutrição e ferrólise**. Revista Agrária Acadêmica, [s. l.], v. 7, ed. 6, p. 116-127, Nov/Dez 2024. DOI 10.32406/v7n6/2024/116-127/agrariacad. Disponível em: <https://agrariacad.com/wp-content/uploads/2025/02/Rev-Agr-Acad-v7-n6-2024-p116-127-Diferenciacao-textural-lessivagem-elutriacao-e-ferrolise.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (Ilha Solteira). Departamento de Engenharia Elétrica. **Segurança em eletricidade: Normas de conduta em experimentos com risco potencial de acidente**. 2. ed. rev. e atual. Ilha Solteira: Comissão Interna de Prevenção de Acidentes – CIPA, 2006. 13 p.