



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

ESTUDO DA RESISTIVIDADE DO SOLO E DIMENSIONAMENTO DE MALHA DE ATERRAMENTO

Ronan Moreira Ribas

João Monlevade, MG
2023

Ronan Moreira Ribas

**ESTUDO DA RESISTIVIDADE DO SOLO E
DIMENSIONAMENTO DE MALHA DE
ATERRAMENTO**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.
Orientador: Prof.^o Felipe Eduardo Moreira Cota

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R482e Ribas, Ronan Moreira.

Estudo da resistividade do solo e dimensionamento de malha de aterramento. [manuscrito] / Ronan Moreira Ribas. - 2023.
55 f.

Orientador: Prof. Me. Felipe Eduardo Moreira Cota.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Engenharia elétrica. 2. Medição - Solos - Propriedades elétricas. 3. Sistemas de energia elétrica. 4. Sistemas de energia elétrica - Proteção. I. Cota, Felipe Eduardo Moreira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.3

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ronan Moreira Ribas

Estudo da resistividade do solo e dimensionamento de malha de aterramento

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 29 de março de 2023

Membros da banca

Prof. Me. Felipe Eduardo Moreira Cota - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Me. Edgard Gregory Torres Saravia - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos - Universidade Federal de Ouro Preto

Professor Felipe Eduardo Moreira Cota, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Eduardo Moreira Cota, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/04/2023, às 14:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0505157** e o código CRC **0F690436**.

"A persistência é o caminho do êxito"
– *Charles Chaplin*

Resumo

Os sistemas de aterramentos são fundamentais para garantir proteção à seres vivos e equipamentos durante a ocorrência de uma falta. Na etapa de elaboração do projeto de aterramento, é necessário obter a resistividade do solo e posteriormente sua estratificação. O método de Wenner é o mais usado para medição da resistividade do solo. O equipamento e o *software* empregados nas medições e análise das medidas serão o terrômetro e o software Microsoft Excel 2010. Para fins de informações complementares relacionadas ao solo da área de estudo será elaborado o mapeamento de resistividade pelo *software* ArcGis. A estratificação do solo, simulação e análise de malha de aterramento será feito através do *software* CYMgrid.

Palavras-chave: Resistividade do solo, medições, método de Wenner, estratificação do solo, malha de aterramento

Abstract

Grounding systems are essential to ensure protection of life and equipment during the occurrence of a fault. In the preparation stage of the grounding project, it is necessary to obtain the soil resistivity and subsequently its stratification. The Wenner method is the most used for measuring soil resistivity. The equipment and the *software* used in the measurements and analysis of the measures will be the thermometer and the Microsoft Excel 2010 software. ArcGis. Soil stratification, simulation and grounding mesh analysis will be done using *software* CYMgrid.

Keywords: Soil resistivity, measurements, Wenner's method, soil stratification, grounding grid

Lista de ilustrações

Figura 1 – Constituição de um aterramento.	5
Figura 2 – Conexão aparafusada (esquerda); Conexão exotérmica tipo T (meio); Conexão exotérmica tipo X (direita).	5
Figura 3 – Ilustração de um cubo de dimensões unitárias	6
Figura 4 – Resistividade x Umidade percentual em solo arenoso.	9
Figura 5 – Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade.	10
Figura 6 – Linhas de correntes elétricas.	13
Figura 7 – Linhas de correntes elétricas.	14
Figura 8 – Ponto imagem.	14
Figura 9 – Medição por amostragem da resistividade de um determinado solo.	15
Figura 10 – Arranjo de eletrodo central.	17
Figura 11 – Arranjo de Schulumberger-Palmer.	18
Figura 12 – Arranjo de Wenner.	19
Figura 13 – Projeção dos potenciais 2 e 3, considerando imagem dos pontos 1 e 4.	20
Figura 14 – Esquema de ligação dos componentes para medição.	22
Figura 15 – Penetração na profundidade “a”.	22
Figura 16 – Croqui recomendado para duas linhas de medição.	23
Figura 17 – Croquis para medição de resistividade.	24
Figura 18 – Solo real (esquerda) e representação de solo estratificado (direita).	26
Figura 19 – Dispersão de correntes no solo.	27
Figura 20 – Curva ρ x a descendente (a) e curva ρ x a ascendente (b).	28
Figura 21 – Curvas para K positivo.	29
Figura 22 – Curvas para K negativo.	29
Figura 23 – Curva ρ x a típicas de solos de duas camadas.	30
Figura 24 – M_0 em função de ρ_2/ρ_1	31
Figura 25 – Modelo de duas camadas.	31
Figura 26 – Ilustração da variação de potencial de acordo com o tamanho do reticulado.	32
Figura 27 – Esquema de potencial de passo.	33
Figura 28 – Esquema de potencial de toque.	34
Figura 29 – Área onde foram realizadas medições.	37
Figura 30 – Medida de resistividade do solo.	38
Figura 31 – Mapa de localização do pontos coletados.	39
Figura 32 – Página inicial <i>software</i> CYMGRD	40
Figura 33 – Mapa de resistividade com espaçamento 2,0m.	44
Figura 34 – Mapa de resistividade com espaçamento 4,0m.	44

Figura 35 – Mapa de resistividade com espaçamento de 8,0m.	45
Figura 36 – Curva de estratificação do solo levantada pelo <i>software</i> CYMgrd no ponto 4 da Tabela 8.	46
Figura 37 – Resultado numérico obtido pelo <i>software</i> CYMgrd no ponto 4 da Tabela 8.	47
Figura 38 – Curva de estratificação do solo levantada pelo <i>software</i> CYMgrd no ponto 22 da Tabela 8.	47
Figura 39 – Resultado de estratificação do solo pelo <i>software</i> CYMgrd no ponto 3 da Tabela 8.	48
Figura 40 – <i>Design</i> da malha de terra em 2D e 3D.	51
Figura 41 – Distribuição de potenciais no solo e elevação de potencial da malha (GPR - Ground Potential Rise).	52
Figura 42 – Gradiente de tensão da superfície no solo.	52

Lista de tabelas

Tabela 1 – Frações granulométricas encontradas nos Sistema de Classificação Norte Americano (USDA) e Internacional (ISSS).	4
Tabela 2 – Valores típicos de resistividade de alguns tipos de solos.	8
Tabela 3 – Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade.	9
Tabela 4 – Variação da resistividade com a temperatura para um solo arenoso.	10
Tabela 5 – Influência da concentração de sais na resistividade de um solo arenoso.	11
Tabela 6 – Área do terreno e número mínimo de linhas de medição.	23
Tabela 7 – Dados obtidos a partir do levantamento de campo.	42
Tabela 8 – Valores calculados de resistividade de solo.	43
Tabela 9 – Resultados de estratificação do solo.	49
Tabela 10 – Dados iniciais para simulação de malha de aterramento.	50

Lista de Siglas

ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
SIG	Sistema de Informações Geográficas

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação e Justificativa	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura do Trabalho	2
2	CARACTERÍSTICAS DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NO ATER- RAMENTO	3
2.1	Origem e Formação dos solos	3
2.2	Classificação Textural ou Granulométrica	3
2.3	Introdução ao Sistema de Aterramento	4
2.4	A Resistividade do Solo: Definição	6
2.5	Fatores que Determinam a Resistividade do Solo	7
2.5.1	Tipo de solo	7
2.5.2	Umidade do solo	8
2.5.3	Temperatura do solo	10
2.5.4	Granulometria do solo	11
2.5.5	Compacidade do solo	11
2.5.6	Concentração e tipos de sais dissolvidos na água	11
2.6	Resistência de Aterramento	12
3	MODELAGEM DO MÉTODO DE WENNER E METODOLOGIAS DE MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO	13
3.1	Potencial em um Ponto	13
3.2	Potencial em um Ponto Sob a Superfície de um Solo Homogêneo	14
3.3	Medição por Amostragem	15
3.4	Método de Queda de Potencial	16
3.4.1	Arranjo de eletrodo central	16
3.4.2	Arranjo de Schlumberger-Palmer	17
3.4.3	Arranjo de Wenner	18
3.5	Método de Wenner	19
3.6	Medição Local pelo Método de Wenner	21
3.7	Análise Espacial de Superfícies	24
3.7.1	Inverso Ponderado da Distância	25
4	ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO E PROJETO DE MALHA DE ATER- RAMENTO	26

4.1	Modelagem Matemática Convencional	27
4.2	Método de Duas Camadas Usando Curvas	28
4.3	Método Simplificado para Estratificação do Solo em Duas Camadas	30
4.4	Potenciais de Segurança	32
4.4.1	Potencial de Passo	33
4.4.2	Potencial de Toque	34
4.5	Procedimento de Projeto de Malha de Aterramento em Subestações	35
5	MATERIAL E MÉTODOS	37
5.1	Caracterização de Área	37
5.2	Medições em Campo	38
5.3	Georreferenciamento dos Pontos	39
5.4	CYMGRD	39
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
6.1	Resultados das Medições	42
6.2	Geração de Mapas	43
6.3	Estratificação do Solo	45
6.4	Simulação Malha de Aterramento	49
6.4.1	Estimativa da Área Mínima da Malha	50
6.4.2	<i>Design da Malha</i>	50
7	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS	54

1 Introdução

A demanda crescente de energia está intimamente ligada ao crescimento econômico e social de um país. Com a ampliação dos sistemas de geração, transmissão e distribuição, os sistemas de aterramentos passaram a ser ainda mais necessários visando a proteção dos mesmos. Além disso, visa garantir a proteção de pessoas contra choques elétricos através do contato em equipamentos e estruturas com falhas de isolamento proporcionando uma adequada condução de corrente de falta para o solo.

Outro objetivo do sistema de aterramento é proporcionar um caminho seguro para terra de correntes induzidas por descargas atmosféricas. Segundo (ELAT, 2019), ocorre anualmente cerca de 110 mortes causadas por raios no Brasil, além de serem responsáveis por cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição.

Para garantir o bom funcionamento do aterramento é necessário assegurar uma correta união das partes metálicas da instalação, o contato permanente do terreno com os eletrodos de terra e uma boa resistividade do solo. Quanto menor for o valor da resistividade, melhor condutor ele será e mais facilmente permitirá a passagem da corrente elétrica para o solo.

Na elaboração do projeto de aterramento, é de fundamental importância o conhecimento das características do solo, principalmente sua resistividade elétrica. É importante ressaltar os fatores que influenciam a resistividade do solo, são eles: tipo de solo, teor de umidade, temperatura, compactação e pressão, concentração e composição química dos sais dissolvidos na água retida (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

O método de Wenner, ou seja, o arranjo de quatro eletrodos colineares igualmente espaçados é o mais utilizado para medição de resistividade do solo. São aplicados diferentes espaçamentos na medição de um solo, podendo assim obter resultados apresentados em gráficos bidimensionais, onde a ordenada é representada pela resistividade aparente medida e a abscissa representada pelo espaçamento adotado entre as hastes. Esses gráficos apresentam informações relacionadas ao número de camadas que o solo apresenta.

1.1 Motivação e Justificativa

Um sistema de aterramento é projetado para oferecer segurança a seres vivos expostos à potenciais elétricos perigosos e evitar danos a equipamentos e estruturas em qualquer situação de falha elétrica.

O município de João Monlevade está localizado numa região de extração e beneficiamento de minério, fortalecendo o setor de montagem e manutenção industrial. Nesse sentido, a cidade oferece oportunidades para avanço das empresas já instaladas e atração para montagem de novas empresas.

O principal parâmetro levado em consideração para projetar um sistema de aterramento é o conhecimento da resistividade do solo local. Portanto, uma vez que se deseja iniciar uma construção, é importante considerar o tipo de solo e sua resistividade. De posse desses dados, deseja-se elaborar um sistema de aterramento com valores mínimos de resistência de terra.

Desse modo, o trabalho tem por objetivo realizar medições de resistividade do solo em pontos pré-definidos e levantar os tipos de solos da área determinada. Posteriormente, elaborar um mapa de resistividade da área de estudo e simulação de malha de aterramento.

1.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral o levantamento da resistividade do solo, simulação e análise de uma malha de aterramento.

Compreende os objetivos específicos deste trabalho:

- Correlacionar os valores de resistividade medida com as características físicas do solo;
- Elaborar mapas representativos de resistividade do solo medida da região de estudo.
- Modelar o solo por meio de estratificação;
- Identificar o tipo de solo do estudo de caso;
- Realizar simulação de malha de aterramento utilizando dados coletados em um dos pontos de medição.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está organizado em quatro capítulos que dão base para oferecer esclarecimentos sobre resistividade do solo e sua influência no sistema de aterramento. O capítulo 2 retrata uma breve discussão sobre processos de formação e classificação do solo, somando-se a isso, descreve os principais fatores que determinam a resistividade do solo e sua importância para o projeto de sistema de aterramento.

No capítulo 3 é descrito o modelo matemático que se baseia o método de Wenner, além dos procedimentos recomendados para realizar medições em campo de forma a se obter resultados mais fidedignos para a resistividade do solo.

O capítulo 4 descreve sobre método de estratificação do solo em duas camadas e procedimentos para dimensionamento de malha de terra.

2 Características do Solo e Sua Influência no Aterramento

2.1 Origem e Formação dos solos

O solo é resultado da ação simultânea e unificada do clima e organismos que atuam sobre a rocha (material de origem), que ocupa determinada paisagem ou relevo, durante um período de tempo. Esses elementos (rocha, clima, organismo, relevo e tempo) são chamados de formadores do solo e atuam de forma conjunta (LIMA, 2001).

Segundo Lima (2001), a ação de diversos processos de formação durante seu desenvolvimento como perdas, transformações, transportes e adições são responsáveis pela transformação da rocha em solo. Compreende-se como a diferença de rocha e solo por este ser constituído de uma sucessão vertical de camadas que diferem entre si na cor, espessura, granulometria, conteúdo de matéria orgânica e nutrientes de plantas.

Para a compreensão dos processos de formação do solo é necessário entender o conceito de intemperismo, um conjunto de processos físicos e químicos responsáveis pela modificação das rochas quando expostas ao tempo. No intemperismo físico (desintegração), as rochas sofrem rupturas progredindo para partículas menores, através de agentes como água, temperatura, pressão, vegetação e vento formam-se os pedregulhos e as areias (solos de partículas grossas). Já no intemperismo químico (decomposição) há modificação mineralógica das rochas de origem, sendo a água o principal agente e os mais importantes mecanismos modificadores são a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos resultantes do apodrecimento de vegetais e animais (CAPUTO, 1989).

Os solos obedecem a várias classificações para sua identificação. A classificação textural, por sua vez, indica características texturais enquadrando os solos em até quatro grupos (areia, silte, argila e cascalho), deste modo, são agrupados quanto a granulometria, ou seja, tamanho de partículas.

2.2 Classificação Textural ou Granulométrica

De acordo com o sistema de classificação textural, areia, silte e argila são as três frações texturais de um solo que apresentam amplitudes de tamanho variáveis. Quando há o predomínio de partículas minerais de maior diâmetro, o solo é classificado como cascalhento, ou arenoso; quando houver predomínio de minerais coloidais (pegajosos), o solo é classificado como argiloso. Todas as transições entre esses limites são encontrados na natureza.

São considerados dois sistemas de classificação como os mais importantes baseados

em critérios arbitrários na separação dos tamanhos das diferentes frações. O Sistema Norte Americano, desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e o Sistema Internacional ou Atterbeg desenvolvido pela Sociedade Internacional de Ciência de Solo (ISSS), como representado pela Tabela 1.

Tabela 1 – Frações granulométricas encontradas nos Sistema de Classificação Norte Americano (USDA) e Internacional (ISSS).

Frações	Sistemas	
	USDA	ISSS
	-----Diâmetro (mm)-----	
Areia muito grossa	2-1	-----
Areia grossa	1-0,5	2-0,2
Areia média	0,5-0,25	-----
Areia fina	0,25-0,10	0,2-0,02
Areia muito fina	0,10-0,05	-----
Silte	0,05-0,002	0,02-0,002
Argila	<0,002	<0,002

Fonte: (NETO, 2006).

A fração areia consiste em partículas com diâmetro entre 0,05 e 2,00 mm, apresentam aspecto de aspereza e geralmente são visíveis ao olho nu. A fração silte compreende partículas com diâmetro entre 0,002 e 0,05 mm, não apresentam aspecto de aspereza e não são visíveis ao olho nu. Por fim, a fração argila apresenta diâmetro menor que 0,002 mm.

Na literatura pedológica são definidos os tipos de solo de acordo com a classificação textural, ou seja, o tamanho de suas partículas. Em contrapartida, nos estudos de aterramentos que abordam a resistividade do solo, há menção desses tipos, porém, não são abordados seus atributos de classificação. Neste sentido, o intuito desse tópico é esclarecer como é feita essa classificação dos tipos de solos e auxiliar na sua identificação em campo.

2.3 Introdução ao Sistema de Aterramento

Um aterramento elétrico consiste em uma ligação proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo (VISACRO, 2002). Este pode ser constituído de três componentes, conforme ilustra a Figura 1:

- Conexões elétricas que ligam o sistema aos eletrodos de aterramento;
- Eletrodos de aterramento podem ser qualquer corpo metálico inserido no solo;
- A terra onde está cravado os eletrodos.

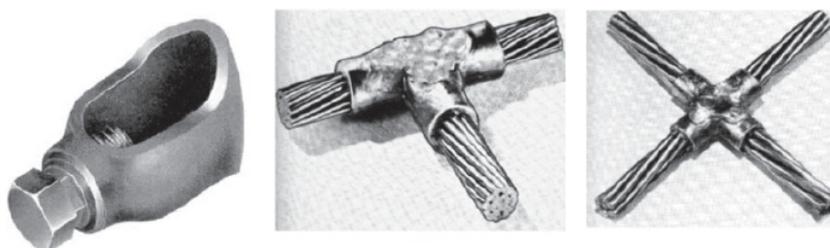
Figura 1 – Constituição de um aterramento.



Fonte: (BGF CONSULTORIA, 2019).

De acordo com Mamede (2010), as conexões utilizadas para conectar os condutores na emendas ou derivações podem ser: conectores aparafusados ou conexões exotérmicas tipo derivação (T) ou tipo cruzamento (X). Os eletrodos podem ser constituídos de aço galvanizado ou aço cobreado, sendo o último mais utilizado por adquirir elevada resistência à corrosão.

Figura 2 – Conexão aparafusada (esquerda); Conexão exotérmica tipo T (meio); Conexão exotérmica tipo X (direita).



Fonte: Adaptado de MAMEDE, 2010.

É importante destacar que os eletrodos verticais são usados principalmente quando as camadas mais profundas do solo têm menor resistividade, e também por razões práticas e fácil cravação no solo (VISACRO, 2002).

Segundo Kindermann e Campagnolo (1995), o aterramento tem como objetivos principais:

- Obter uma mínima resistência de aterramento para correntes de falta à terra;

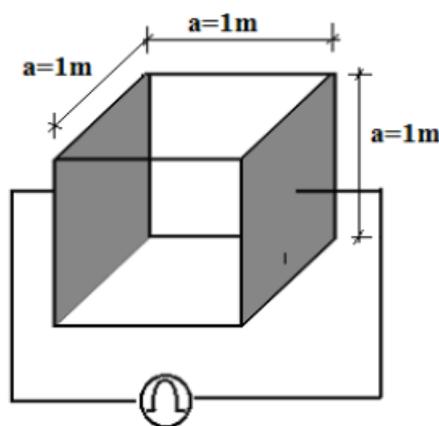
- Assegurar os potenciais de tensão produzidos pelas correntes de falta dentro dos limites de segurança de modo a não causar riscos aos seres vivos;
- Tornar os equipamentos de proteção mais sensíveis, isolando mais rapidamente as falhas à terra;
- Proporcionar um caminho de escoamento para a terra de descargas atmosféricas;
- Usar a terra como retorno para a corrente em sistema MRT (Monofilar com Retorno a Terra);
- Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças de equipamentos.

Os sistemas de aterramento podem ser compostos por: uma simples haste cravada no solo, hastes em linha, em triângulo, em quadrado, em círculo, placas de material condutor no solo, fios ou cabos enterrados no solo formando uma malha de terra (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

2.4 A Resistividade do Solo: Definição

A resistividade específica de um solo pode definir-se como sendo a resistência elétrica $R[\Omega]$, medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (aresta = $1m$, área das faces $A = 1m^2$), preenchido com terra do respectivo solo (COELHO, 2011), como representado na Figura 1.

Figura 3 – Ilustração de um cubo de dimensões unitárias



Fonte: COELHO, 2011.

A resistividade elétrica do solo é calculada de com a Equação (3.11):

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

sendo:

ρ = resistividade calculada do solo, em $[\Omega.m]$;

R = resistência calculada a partir de $V[V]$ e $I[A]$, em $[\Omega]$;

A = área da face da cuba, em $[m^2]$;

L = comprimento lateral da cuba, em $[m]$.

2.5 Fatores que Determinam a Resistividade do Solo

Segundo NBR (7117:2012), na sua grande maioria, os solos são heterogêneos e formados por diversas camadas e profundidades diferentes, de modo que o valor de sua resistividade varia de local para local. A seguir são considerados os principais parâmetros que influenciam no valor da resistividade de um solo, são eles:

- Tipo;
- Umidade;
- Temperatura;
- Granulometria;
- Compacidade;
- Concentração e tipos de sais dissolvidos na água.

2.5.1 Tipo de solo

Os valores de resistividade para os solos são bastante distintos devido a grande variedade de solos existentes. A variação de resistividade de um local para outro é devido à formação geológica dos solos, já a variação em um mesmo local é devido à profundidade das camadas estratificadas do solo. A Tabela 2 mostra a relação entre os tipos de solo e suas resistividades características.

Tabela 2 – Valores típicos de resistividade de alguns tipos de solos.

Tipos de solo	Faixa de resistividades ($\Omega \cdot m$)
Água do mar	menor do que 10
Alagadiço, limo, humus, lama	até 150
Água destilada	300
Argila	300 – 5 000
Calcário	500 – 5 000
Areia	1 000 – 8 000
Granito	1 500 – 10 000
Basalto	a partir de 10 000
Concreto ^a	Molhado: 20 – 100 Úmido: 300 – 1 000 Seco: 3 k $\Omega \cdot m$ – 2 M $\Omega \cdot m$
^a A categoria molhado é típica de aplicação em ambientes externos. Valores inferiores a 50 $\Omega \cdot m$ são considerados altamente	

Fonte: NBR 7117:2012.

2.5.2 Umidade do solo

A umidade é responsável por alterar a resistividade do solo. Uma porcentagem maior de umidade faz com que os sais presentes no solo se dissolvam, formando um meio eletrolítico favorável à passagem de corrente iônica. Dessa forma, um determinado tipo de solo, com diferente concentração de umidade, apresenta uma grande variação na sua resistividade (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995). Na Tabela 3, para um solo arenoso é mostrado a variação da resistividade com o índice de umidade.

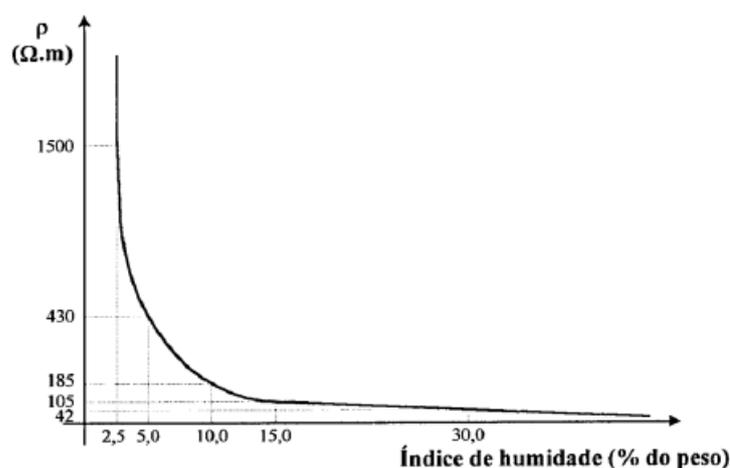
Tabela 3 – Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade.

Umidade (% por peso)	Resistividade $\Omega.m$ (solo arenoso)
0,0	$\rightarrow \infty$
2,5	1500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Fonte: Adaptado de (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

Através da Tabela 3 observa-se que a resistividade diminui com o aumento da concentração de umidade. No entanto, não é possível garantir sempre esse mesmo comportamento, pois no caso de um solo contendo uma concentração de sais dissolvidos na água de valor muito baixo ou no caso de a água estar congelada, a estrutura cristalina do gelo confere-lhe alta resistividade.

Figura 4 – Resistividade x Umidade percentual em solo arenoso.



Fonte: Adaptado de (VISACRO, 2002)

Na Figura 4, mostra-se a relação entre a resistividade e a umidade para um solo arenoso, podendo as conclusões daí tiradas (relação de resistividade - índice de umidade) serem extrapoladas para outros tipos de solos. Nota-se que a resistividade varia de uma forma significativa para as variações do índice de umidade que vão de 0 a 15% (TEIXEIRA, 2000).

2.5.3 Temperatura do solo

Segundo Kindermann e Campagnolo (1995), para a interpretação do efeito da temperatura na resistividade do solo são considerados dois aspectos: o aumento significativo da temperatura do solo implica no aumento da evaporação do mesmo, tornando o terreno mais seco, e conseqüentemente, com uma maior resistividade. Por outro lado, se a temperatura do solo baixar drasticamente para valores inferiores a zero, a água irá transformar em gelo, aumentando significativamente o valor da resistividade do solo. A tabela 4 mostra o comportamento da resistividade de um solo arenoso de acordo com a variação da temperatura.

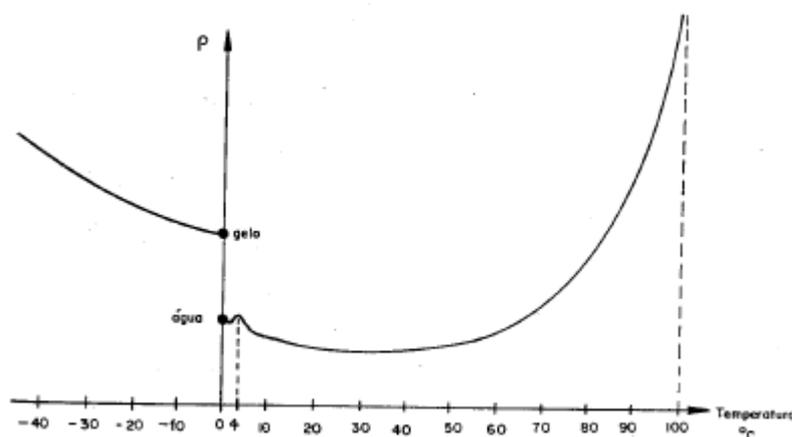
Tabela 4 – Variação da resistividade com a temperatura para um solo arenoso.

Temperatura (°C)	Resistividade (solo arenoso)
20,0	72
10,0	99
0 (estado liquido)	138
0 (estado solido)	300
-5,0	790
-15,0	3300

Fonte: Adaptado de (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

Para melhor compreensão do efeito da temperatura sobre a resistividade do solo é ilustrado na Figura 5 este efeito para uma faixa de valores de temperatura variando entre -40°C a 100°C .

Figura 5 – Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

2.5.4 Granulometria do solo

A granulometria do solo exerce influência em dois aspectos: na capacidade de retenção de água nas camadas do solo e também na continuidade física (VISACRO, 2002).

A influência de uma granulometria maior tende a aumentar a resistividade, visto que afeta a capacidade de retenção de água através do escoamento para camadas mais profundas ou pela evaporação. Também é afetada a continuidade física do solo, através do menor contato existente entre os grãos, a continuidade elétrica é menor.

2.5.5 Compacidade do solo

Segundo Visacro (2002), um solo mais compacto apresenta um valor de resistividade menor proporcionado pela maior continuidade física.

Um aumento da pressão sobre o solo geralmente aumenta a compacidade deste, diminuindo sua resistividade. Recomenda-se a espera de um certo tempo para medição da resistência de terra após a instalação de um aterramento elétrico. O solo demora um certo tempo para se acomodar e melhorar sua compactação.

2.5.6 Concentração e tipos de sais dissolvidos na água

Sabendo-se que a resistividade da água é governada pelos sais dissolvidos (condução eletrolítica) e como a resistividade do solo depende da quantidade de água retida, conclui-se que a resistividade do solo é influenciada pela quantidade e pelos tipos de sais dissolvidos na água retida no mesmo (VISACRO, 2002).

Na Tabela 5 é relacionada a quantidade de sal adicionado a um solo arenoso de umidade 15% (percentual em peso) e temperatura de 17°C, com a resistividade.

Tabela 5 – Influência da concentração de sais na resistividade de um solo arenoso.

Sal adicionado (% em peso)	Resistividade [Ω.m] Solo arenoso
0	107
0,1	18
1,0	1,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1,0

Fonte: (VISACRO, 2002)

2.6 Resistência de Aterramento

O aterramento é entendido como a ligação elétrica de um equipamento ou componente de um sistema elétrico à terra. O termo utilizado para designar a resistência ao escoamento de corrente para o solo através de um aterramento é “resistência de aterramento” (VISACRO, 2002). O valor da resistência de aterramento representa a eficácia desta ligação, ou seja, quanto menor a resistência, melhor o aterramento (LEITE; FILHO, 1996). A relação entre o valor da tensão no eletrodo e o valor de corrente injetada no solo é dada por:

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

Segundo Visacro (2002), esta resistência de aterramento possui três componentes principais:

- Resistência própria do eletrodo e das ligações elétricas ao mesmo (devido a alta condutividade dos metais utilizados seu valor é pequeno);
- Resistência de contato entre o eletrodo e a terra adjacente ao mesmo (de valor desprezível se o eletrodo estiver bem cravado ao solo e isento de qualquer cobertura isolante);
- Resistência da terra circunvizinha ao eletrodo (componente fundamental que determina o valor da resistência de terra e depende basicamente da resistividade do solo e da distribuição da corrente provinda do eletrodo, determinada pela forma e dimensão do mesmo).

Em condições particulares de baixa frequência e aplicando-se simplificações cabíveis, o aterramento comporta-se como uma resistência. Pode ser mostrado que essa resistência é diretamente proporcional à resistividade do solo (ρ) em que os eletrodos estão colocados. A constante de proporcionalidade K expressa apenas os efeitos geométricos (dimensão e forma) dos eletrodos (VISACRO, 2002).

$$R_T = K \cdot \rho \quad (2.3)$$

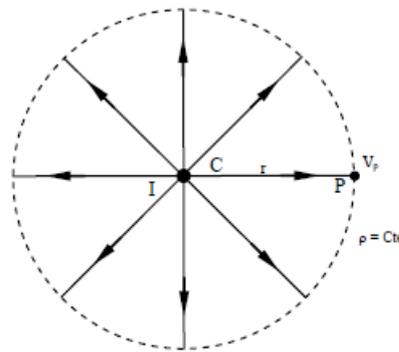
Pela relação anterior, nota-se que a resistência de terra é diretamente proporcional à resistividade do solo. Assim, percebe-se que os fatores que influenciam a resistividade do solo exercem uma influência na mesma proporção sobre a resistência de aterramento.

3 Modelagem do Método de Wenner e Metodologias de Medição da Resistividade do solo

3.1 Potencial em um Ponto

Seja um ponto “c” imerso em um solo infinito e homogêneo, emanando corrente I. O fluxo resultante de corrente diverge radialmente (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995), conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Linhas de correntes elétricas.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

Pela lei de Ohm local, o campo elétrico E_p é:

$$E_p = \rho J_p \quad (3.1)$$

A densidade de corrente J_p é a mesma sobre a superfície da esfera de raio r , com centro no ponto “c” e que passa pelo ponto p . Seu valor é dado por:

$$J_p = \frac{I}{A} = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (3.2)$$

Dessa forma, temos que:

$$E_p = \frac{\rho I}{4\pi r^2} \quad (3.3)$$

O potencial do ponto p , em relação a um ponto infinito é:

$$V_p = \int_r^\infty E dr = \int_r^\infty \frac{\rho I}{4\pi r^2} dr \quad (3.4)$$

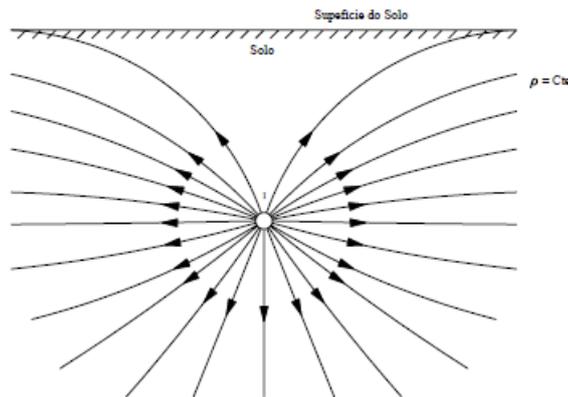
Portanto,

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (3.5)$$

3.2 Potencial em um Ponto Sob a Superfície de um Solo Homogêneo

De acordo com Kindermann e Campagnolo (1995), um ponto imerso sob a superfície de um solo homogêneo, emanando uma corrente elétrica I , produz uma distribuição de corrente conforme ilustrado na Figura 7.

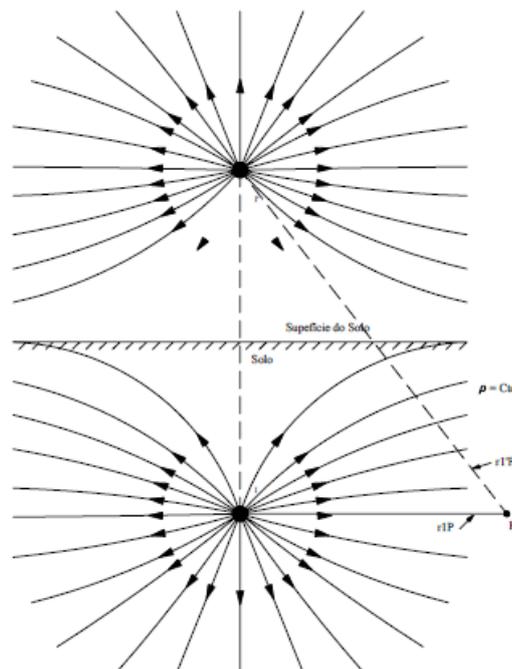
Figura 7 – Linhas de correntes elétricas.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

A Figura 8 mostra que as linhas de corrente se comportam como se houvesse uma fonte pontual simétrica em relação à superfície do solo.

Figura 8 – Ponto imagem.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

O comportamento é idêntico a uma imagem real simétrica da fonte de corrente pontual. Para encontrar o potencial de um ponto P em relação ao infinito, efetua-se a superposição do efeito de cada fonte da corrente individualmente. Portanto, basta usar duas vezes a Equação (3.5) para calcular o potencial do ponto P.

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi r_{1p}} + \frac{\rho I'}{4\pi r'_{1p}} \quad (3.6)$$

Sabendo que:

$$I' = I \quad (3.7)$$

Por fim, o potencial é dado por:

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r_{1p}} + \frac{1}{r'_{1p}} \right) \quad (3.8)$$

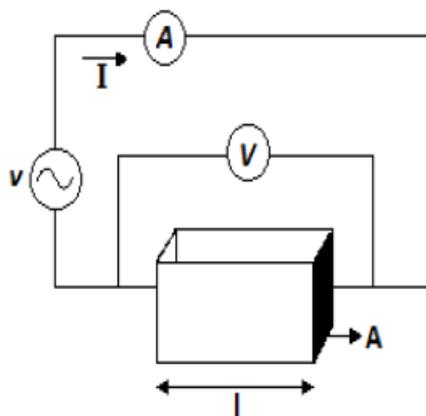
3.3 Medição por Amostragem

Neste método, a amostra do solo é retirada de uma grande profundidade, dessa forma terá sofrido menos alterações devido às variações ambientais. No entanto, nunca será possível reproduzir a mesma compactação e umidade do solo original (FLORES, 2014).

A amostragem física do solo (deformada e/ou indeformada) pode fornecer um critério comparativo com os resultados obtidos em campo pelo método dos quatro pontos (NBR, 7117:2012).

O ensaio em laboratório consiste em medir a resistência R, entre duas faces condutoras opostas de um cubo de dimensões conhecidas, preenchido com uma amostra firmemente compactada do solo recolhido a uma profundidade suficiente para se considerar imune às variações das condições ambientais. O processo é ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Medição por amostragem da resistividade de um determinado solo.



Fonte: (COELHO, 2011)

A partir de uma tensão aplicada às faces condutoras do cubo, determina-se a resistência através da relação de tensão e corrente medidas. Posteriormente, calcula-se a resistividade da amostra do solo através das seguintes equações.

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.9)$$

$$\rho = \frac{R.A}{L} \quad (3.10)$$

$$R = \frac{\rho.L}{A} \quad (3.11)$$

É de primordial importância o conhecimento prévio das características do solo, sobretudo a homogeneidade da sua constituição (MAMEDE, 2010). Nesse sentido, não se pode assegurar que a amostra presente em laboratório exatamente as mesmas características que apresentava no local de origem, devido a dificuldade de reproduzir as mesmas condições de compactação, umidade e temperatura do seu local inicial.

3.4 Método de Queda de Potencial

O método mais usado para calcular a resistividade do solo a partir da resistência medida pelo terrômetro é o da Queda de Potencial, com o arranjo de Wenner, Palmer-Schlumberger ou de eletrodo central (MANSUR, 2014). Todos esses arranjos baseiam-se no princípio da queda de potencial. Neles pode-se elaborar a curva da resistividade em função do espaçamento ($\rho \times a$).

Dentre os pesquisadores que mais contribuíram para o desenvolvimento de métodos geoeletricos de medição de resistividade destacam-se Conrad Schlumberger, da “Escola Francesa” e Frank Wenner, da “Escola Americana”. Eles foram responsáveis pela introdução do arranjo de quatro eletrodos para medidas de resistividade de superfície (BORGES, 2002).

3.4.1 Arranjo de eletrodo central

De acordo com NBR 7112 (2012), este arranjo é recomendado para prospecção a grandes profundidades ou em locais onde a resistividade é muito elevada. São utilizados quatro eletrodos para medição da resistividade do solo. Uma corrente é injetada nos eletrodos mais externos e a diferença de potencial é medida entre os eletrodos mais internos.

Ainda, segundo NBR 7117:2012, o eletrodo C_2 é fixado no centro da área a ser medida, variando-se a posição de C_1 , P_1 , e P_2 , e obedecendo-se à condição $d_3 \gg d_1$ e d_2 , conforme Figura 10.

A resistividade de acordo com uma profundidade H (dada pela média das distâncias d_1 , d_2 e d_3) é calculada pela Equação (3.12).

$$\rho_H = \frac{2\pi d_1(d_1 + d_2)}{d_2} \frac{V}{I} \quad (3.12)$$

onde:

$$H = (d_1 + d_2 + d_3)/3 \quad (3.13)$$

sendo:

ρ_H = resistividade em função da profundidade, em $[\Omega.m]$;

V = tensão medida, em $[V]$;

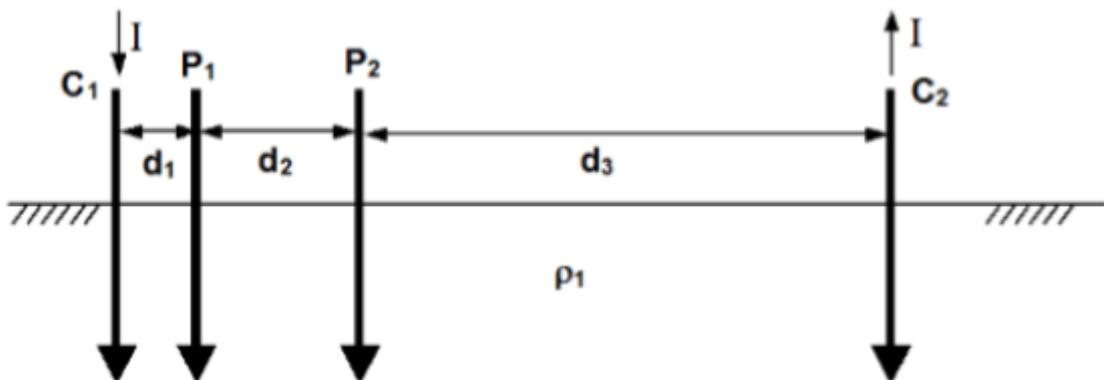
I = corrente ,em $[A]$;

d_1 = distância entre os eletrodos C_1 e P_1 , em $[m]$;

d_2 = distância entre os eletrodos P_1 e P_2 , em $[m]$;

d_3 = distância entre os eletrodos C_2 e P_2 , em $[m]$; em $[m]$.

Figura 10 – Arranjo de eletrodo central.



Fonte: (NBR, 7117:2011)

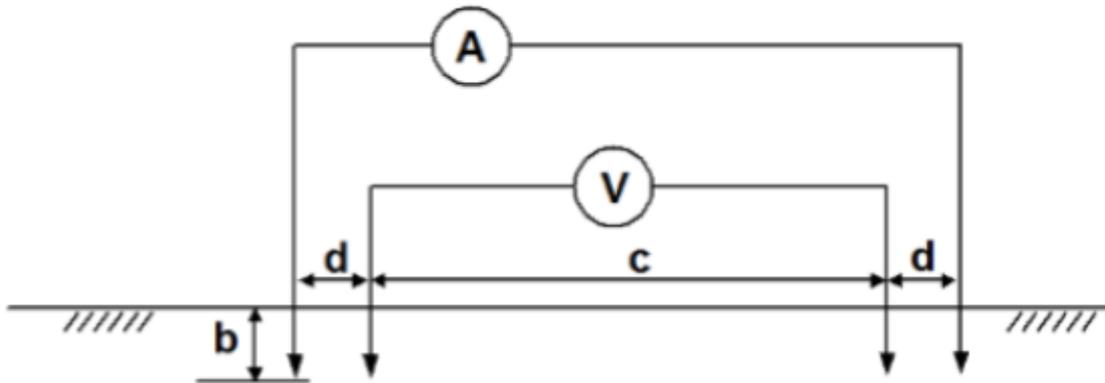
Se $d_1 = d_2$:

$$\rho = 4\pi d_1(V/I) \quad (3.14)$$

3.4.2 Arranjo de Schlumberger-Palmer

Este arranjo é indicado para terrenos de alta resistividades (maior ou igual a $3000\Omega.m$) e para grandes espaçamentos (NBR, 7117:2012). Para isso, são necessários terrômetros de alta potência para operar de forma eficiente. Os eletrodos de potencial são posicionados muito próximos aos eletrodos de corrente correspondentes para melhorar a resolução da medida de tensão, conforme mostra o esquema da Figura 11.

Figura 11 – Arranjo de Schulumberger-Palmer.



Fonte: (NBR, 7117:2011)

Se a profundidade b for pequena comparada com os espaçamentos d e c , a resistividade pode ser calculada pela seguinte Equação:

$$\rho = \frac{\pi d(c + d)}{c} \frac{V}{I} \quad (3.15)$$

sendo:

ρ = resistividade a ser calculada, em $[\Omega.m]$;

V = tensão medida, em $[V]$;

I = corrente, em $[A]$;

b = profundidade dos eletrodos, em $[m]$;

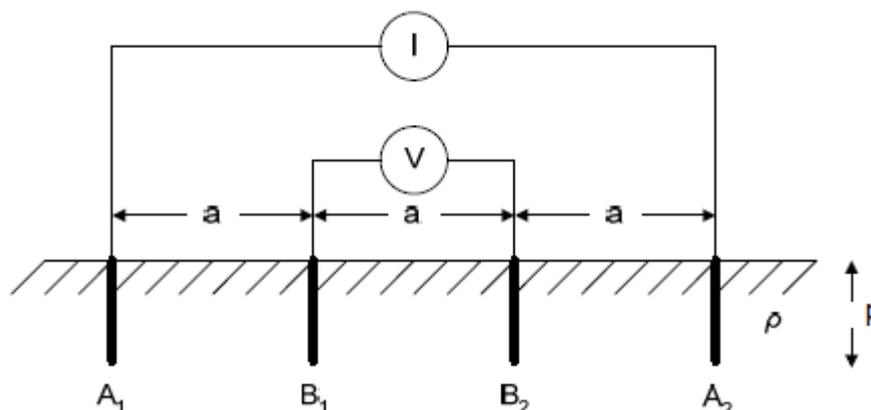
c = espaçamento entre eletrodos de tensão, em $[m]$;

d = espaçamento entre o eletrodo de corrente e tensão, em $[m]$.

3.4.3 Arranjo de Wenner

Neste método são utilizados quatro hastes em linha, igualmente espaçadas, conforme mostra a Figura 12. Injetada corrente nos eletrodos mais externos, mede-se a tensão nos eletrodos mais internos.

Figura 12 – Arranjo de Wenner.



Fonte: (RAGGI, 2009)

A resistividade é dada em função da distância “d” dos eletrodos adjacentes e da profundidade “p” de cravação destes (NBR, 7117:2012).

$$\rho = \frac{4\pi a(V/I)}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} [\Omega.m] \quad (3.16)$$

sendo:

ρ = resistividade a ser calculada, em [$\Omega.m$];

V = tensão medida, em [V];

I = corrente, em [A];

p = profundidade dos eletrodos, em [m];

a = espaçamento entre eletrodos, em [m];

Para a condição $p \leq a/10$:

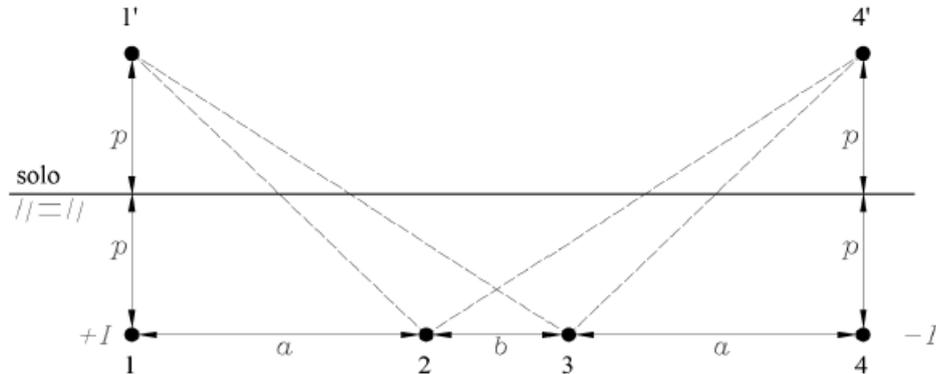
$$\rho \cong 2\pi a(V/I) \quad (3.17)$$

3.5 Método de Wenner

O método utiliza quatro eletrodos verticais cravados no solo à mesma profundidade “p”, dispostos em linha e igualmente espaçados (Vide Figura 12). De acordo com Kindermann e Campagnolo (1995), uma corrente I é injetada no eletrodo A_1 e coletada pelo eletrodo A_2 e a tensão V é gerada nos eletrodos internos B_1 e B_2 , produzida pela corrente que passa pelo solo entre os eletrodos externos. A razão entre essas duas grandezas corresponde à resistência “R” do solo, associada à distância “a” entre os eletrodos.

O cálculo da queda de potencial nos eletrodos internos 2 e 3 é baseado no método das imagens, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Projeção dos potenciais 2 e 3, considerando imagem dos pontos 1 e 4.



Fonte: Adaptado de (VIANA, 2016).

Para calcular o potencial no ponto 2, basta usar duas vezes a Equação (3.8).

$$V_2 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a+b} - \frac{1}{\sqrt{(a+b)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (3.18)$$

Da mesma forma calcula-se o potencial no ponto 3:

$$V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a+b} + \frac{1}{\sqrt{(a+b)^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right] \quad (3.19)$$

É importante observar que na Figura 13 os espaçamentos “a” não são iguais ao espaçamento “b”, porém, no método de Wenner é considerado espaçamentos iguais. Dessa forma, basta considerar $b=a$ no método de Wenner para calcular os potenciais V_2 e V_3 . Seguindo esse raciocínio, a diferença de potencial entre os pontos 2 e 3 é:

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (3.20)$$

O valor da resistência elétrica R do solo para uma profundidade aceitável de penetração de corrente I é dado pela razão da diferença de potencial V_{23} pela corrente I .

$$R = \frac{V_{23}}{I} = \frac{\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (3.21)$$

Dessa forma, a resistividade elétrica do solo é dada por:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} [\Omega.m] \quad (3.22)$$

Frank Wenner mostrou que existe uma relação linear entre o valor da resistividade do solo e a resistência medida (VISACRO, 2002).

$$\rho = K.R \quad (3.23)$$

O valor da constante K depende da geometria empregada nas medições. Seu valor é dado por:

$$K = \frac{4\pi a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad (3.24)$$

De acordo com (VISACRO, 2002), na formulação da constante geométrica K, percebe-se que, nas condições usuais de aplicação, o valor do denominador da equação (3.24) varia entre 1 e 2, dependendo da relação entre a profundidade das hastes e do espaçamento. Isso implica simplificações na formulação:

- Se a profundidade “p” é muito grande comparada com o espaçamento “a”, o denominador da equação (3.24) se aproxima da unidade, resultando:

$$\rho \cong 4\pi a R \quad (3.25)$$

- Se a profundidade “p” é pequena comparado com o espaçamento “a” ($p \leq a/10$), tem-se:

$$\rho \cong 2\pi a R \quad (3.26)$$

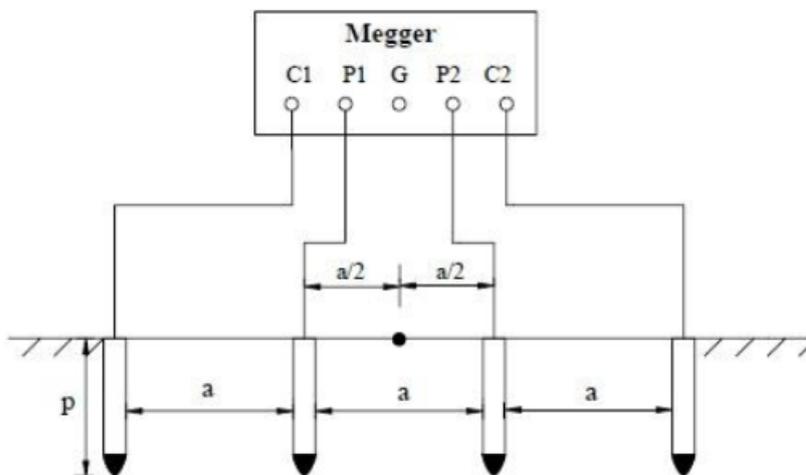
Na sua formulação, Wenner considera o solo homogêneo. Assim, a resistividade do solo que corresponde ao produto entre o valor R medido pela aplicação do método (para cada espaçamento “a”) e o fator geométrico K será constante. Entretanto, raramente tem-se solos realmente homogêneos. Na maior parte dos casos, os solos podem ser aproximados por um meio estratificado em duas camadas horizontais (VISACRO, 2002).

3.6 Medição Local pelo Método de Wenner

O levantamento dos valores de resistividade é feito através de medições em campo, sendo o método de Wenner o mais utilizado dos métodos de prospecção geelétricos. Será tomado como base neste estudo o método de Wenner para medição.

O método utiliza o Megger, instrumento de medida de resistência. O Aparelho, através de sua fonte interna, injeta corrente elétrica entre as duas hastes externas conectadas aos terminais externos C_1 e C_2 . As duas hastes internas são conectadas aos terminais internos P_1 e P_2 . Assim, o aparelho processa internamente e indica o valor de resistência elétrica.

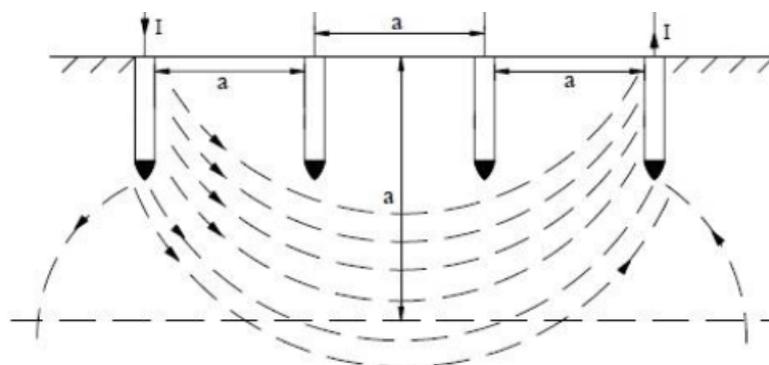
Figura 14 – Esquema de ligação dos componentes para medição.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

O método considera que praticamente 58% da distribuição de corrente que passa pelas hastes externas ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento entre as hastes.

Figura 15 – Penetração na profundidade “a”.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

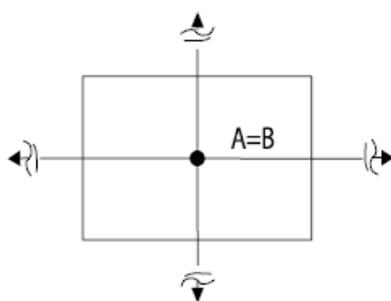
As correntes que atingem uma profundidade maior que a especificada pelo método de Wenner têm, por consequência uma grande área de dispersão, e desta forma seu efeito pode ser desconsiderado. Considera-se o valor de resistência medida a uma profundidade “a” do solo.

As hastes usadas no método devem ter aproximadamente 50cm de comprimento e diâmetro entre 10 e 15mm. As leituras devem ser feitas para vários espaçamentos, sempre com as hastes alinhadas e cravadas a uma mesma profundidade e o aparelho posicionado simetricamente entre elas. É recomendado utilizar como espaçamento das hastes os seguintes valores (em metros): 1, 2, 4, 8, 16 e 32.

O número e localização das linhas de medição será determinado pela dimensão e importância do local, bem como pela variação dos valores encontrados nas diversas medições efetuadas (NBR, 7117:2012).

A recomendação da NBR 7117 para medição em áreas de até $1000m^2$ determina que devem ser realizadas, no mínimo, duas linhas de medição, conforme mostra a Figura 16. No desenvolvimento do trabalho será utilizada esta disposição para realização das medidas. É importante ressaltar que “uma medição” é definida pela norma como sendo o conjunto de leituras obtidas em uma mesma direção de cravamento e diversos espaçamentos tomados entre as hastes.

Figura 16 – Croqui recomendado para duas linhas de medição.



Fonte: Retirado de (NBR, 7117:2012).

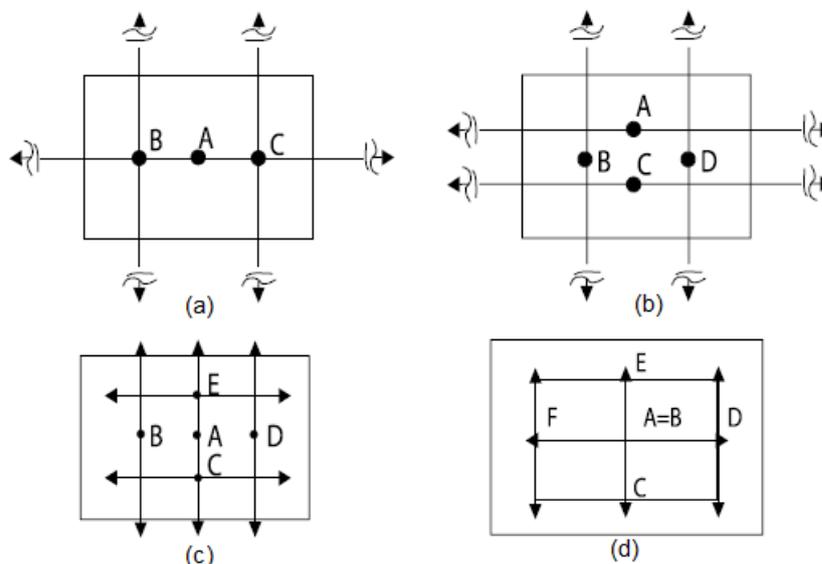
Em terrenos com área inferior ou igual a $1000m^2$ já foi definido anteriormente o croqui de medição. Para áreas superiores, o número mínimo de linhas de medição, bem como os croquis recomendados, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Área do terreno e número mínimo de linhas de medição.

Área do terreno (m^2)	Mínimo de linhas de medição	Croquis para medição
$1000 < S \leq 2000$	3	Figura 24-a
$2000 < S \leq 5000$	4	Figura 24-b
$5000 < S \leq 10000$	5	Figura 24-c
$10000 < S \leq 20000$	6	Figura 24-d

Fonte: Adaptado de (NBR, 7117:2012).

Figura 17 – Croquis para medição de resistividade.



Fonte: Adaptado de (NBR, 7117:2012).

Para realizar a medição em terrenos acima de $20000m^2$, a norma recomenda que este seja dividido em áreas de até $10000m^2$ e assim possa utilizar linhas de medição mais adequadas, como descrito na Tabela 6.

Para projetos de linhas de transmissão devem ser realizadas duas medições em direções ortogonais, preferencialmente, no sentido longitudinal em encaminhamento da linha de transmissão e outra perpendicular.

É importante considerar a variação sazonal da resistividade do solo, devendo realizar a medição num período de sete dias sem chuvas.

Pontos de uma mesma área em que sejam obtidos valores de resistividade com desvio superior a 50% em relação ao valor médio das medições realizadas podem caracterizar uma subárea específica.

Com as resistividades médias para cada espaçamento, pode-se traçar a curva ρ x a, necessária ao procedimento das aplicações dos métodos de estratificação do solo, apresentados no capítulo 4.

3.7 Análise Espacial de Superfícies

As amostras são obtidas usualmente através de levantamento de campo, são valores representativos do fenômeno estudado e apresentam consistência de metodologia e unidade (CAMARGO et al., 2000).

A análise espacial implica a distribuição espacial de dados oriundos de fenômenos ocorridos no espaço, tendo como objetivo mensurar propriedades relacionadas, levando em conta a localização e o padrão espacial do fenômeno em estudo (THIESEN, 2016).

De acordo com Thiesen (2016), existem diferentes metodologias para a análise espacial de dados, mas, em comum, todos os valores devem ser acompanhados de suas respectivas coordenadas geográficas. Nesse contexto, as interpolações buscam descrever fenômenos por meio de equações.

Interpolação é um procedimento matemático de ajuste de função a pontos não amostrados, baseado em valores obtidos em pontos amostrados (LANDIM, 2000).

Para obter superfícies que aproximam o fenômeno estudado de forma realista, é necessário modelar a variabilidade espacial. De forma geral, os modelos responsáveis por gerar a superfície a partir de procedimentos de interpolação representam a variável de como uma combinação da variabilidade em larga e pequena escala acontecem (CAMARGO et al., 2000).

3.7.1 Inverso Ponderado da Distância

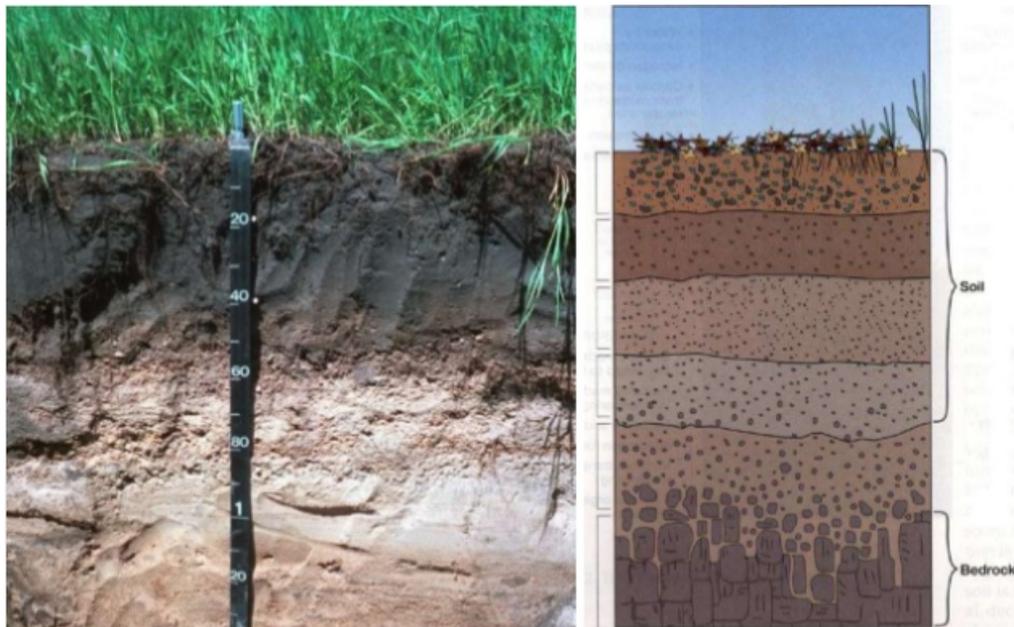
Segundo Landim (2000), dentre os métodos de distância ponderada este é o mais utilizado. O peso dado durante a interpolação é inversamente proporcional à distância do nó da malha, ou seja, pontos amostrados de localização próxima ao nó a ser estimado recebem peso maior que os pontos amostrados de localização mais distante. Assim, quanto mais próximo um ponto estiver do outro, mais seus valores se aproximam (maior será sua correlação espacial).

4 Estratificação do Solo e Projeto de Malha de Aterramento

A determinação dos valores das resistividades do solo e da sua estratificação é de fundamental importância para o cálculo das características de um sistema de aterramento (NBR, 7117:2012).

Em geral, o solo é constituído por diversas camadas, cada uma apresentando uma espessura e um certo valor de resistividade. Por meio de medições é possível determinar o valor da resistividade e obter a estratificação do solo em camadas paralelas ou horizontais de diferentes resistividades e espessuras.

Figura 18 – Solo real (esquerda) e representação de solo estratificado (direita).



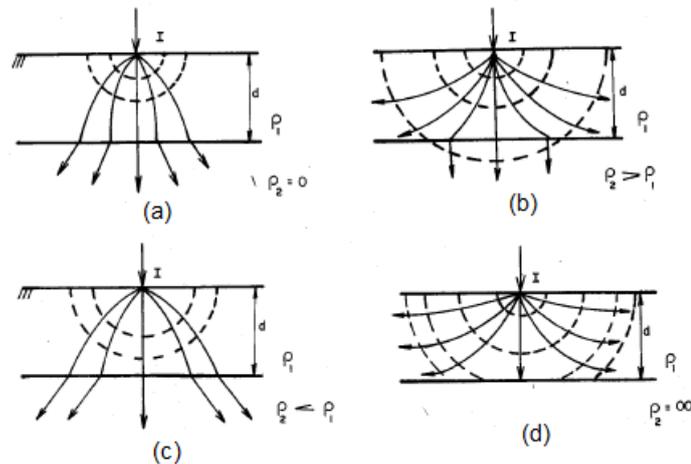
Fonte: (CHAVES, 2015)

Com a variação da resistividade das camadas do solo, tem-se a variação da dispersão de corrente. Na Figura 19, é evidenciada a variação da propagação de corrente entre duas primeiras camadas do solo já estratificado.

Na Figura 19-a, a corrente escoar pelo meio que oferece menor resistência, ou seja, a camada 2. Na Figura 19-b a corrente escoar preferencialmente na primeira camada, visto que a resistividade da segunda camada é maior. Na Figura 19-c a primeira camada apresenta maior resistividade comparada à segunda, dessa forma, a corrente tende a escoar pela segunda camada. Por fim, o caso ilustrado na Figura 19-d mostra que a corrente escoar

somente pela primeira camada, pois a segunda camada apresenta resistividade muito superior comparada à primeira.

Figura 19 – Dispersão de correntes no solo.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

No arranjo de Wenner, a resistividade medida é dada em função do espaçamento dos eletrodos, sendo a curva resultante uma indicação da estrutura do solo. Com base na curva resultante $\rho \times a$, alguns métodos de estratificação do solo tem produzido excelentes resultados comprovados na prática (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995):

- Método de estratificação de duas camadas;
- Método de Pirson;
- Método gráfico.

A seguir, será analisado o método de estratificação do solo em duas camadas, em muitos casos essa representação se mostra bastante satisfatória. O método de Pirson e o método gráfico são usados para efetuar a estratificação do solo em várias camadas, portanto, não serão objeto de estudo deste trabalho.

4.1 Modelagem Matemática Convencional

A determinação da resistividade usando o arranjo de Wenner resulta uma resistividade equivalente em função do espaçamento “a” dos eletrodos, mostrada pela Equação (4.1) (NBR, 7117:2012).

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right\} \quad (4.1)$$

Sendo:

ρ_1 = resistividade da primeira camada;

n = número de medições;

K = fator de reflexão;

h = profundidade da primeira camada;

a = espaçamento os eletrodos.

O fator K representa a mudança brusca da resistividade nos limites de cada camada, definido através da Equação (4.2) (FLORES, 2014).

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4.2)$$

Onde:

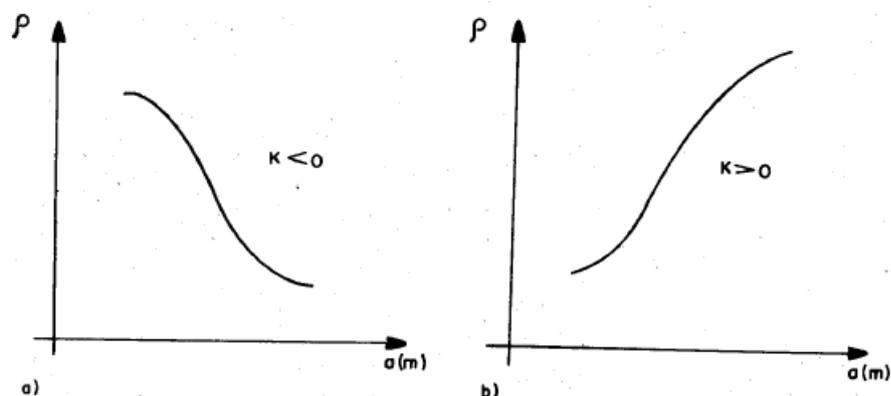
ρ_1 representa a resistividade da primeira camada;

ρ_2 representa a resistividade da segunda camada.

4.2 Método de Duas Camadas Usando Curvas

O fator de reflexão k varia entre -1 e +1. A partir da Equação (4.1), pode-se traçar curvas de $\frac{\rho a}{\rho_1}$ em função de $\frac{h}{a}$ para uma série de valores de K negativos e positivos (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995). As curvas traçadas para K variando na faixa negativa, isto é, curva ρ x a descendente, Figura 20 (a), estão apresentadas na Figura 22. Já para as curvas traçadas para K variando na faixa positiva, isto é, curva ρ x a ascendente, Figura 20 (b), estão apresentadas na Figura 21.

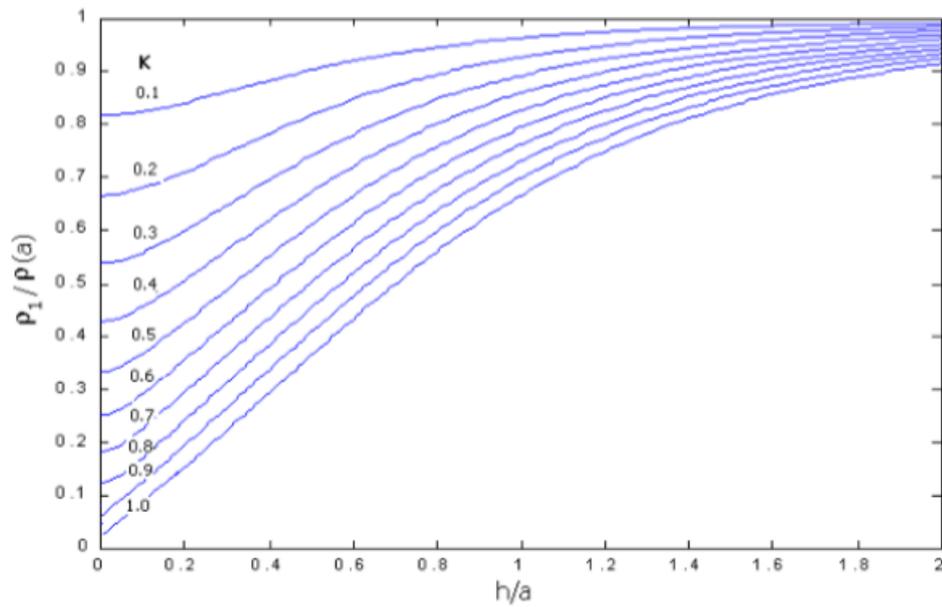
Figura 20 – Curva ρ x a descendente (a) e curva ρ x a ascendente (b).



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

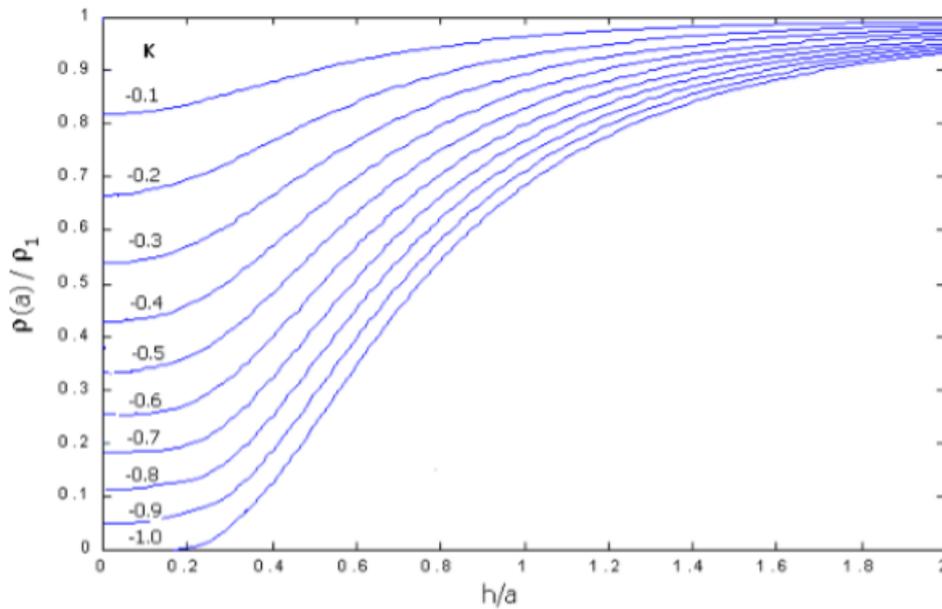
A partir da curva ρ x a , obtida pelas medições, é possível estabelecer um método que faz o casamento com uma das curvas teóricas para K positivo ou negativo.

Figura 21 – Curvas para K positivo.



Fonte: (MANSUR, 2014).

Figura 22 – Curvas para K negativo.



Fonte: (MANSUR, 2014).

Os procedimentos do método são descritos a seguir:

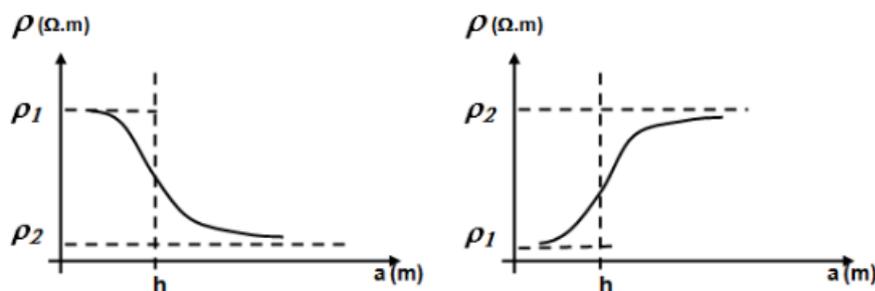
- Prolongar a curva ρ x a até interceptar o eixo das ordenadas, obtendo o valor da resistividade ρ_1 da primeira camada do solo;

- Escolher arbitrariamente um valor para o espaçamento a_1 e levar na curva para obter-se o correspondente valor de ρ_{a1} ;
- Determinar o sinal de K pelo comportamento da curva ρ x a :
 - Efetuar o cálculo de $\frac{\rho a_1}{\rho_1}$ se K for negativo;
 - Efetuar o cálculo de $\frac{\rho_1}{\rho_{a1}}$ se K for positivo.
- Com o valor $\frac{\rho a_1}{\rho_1}$ ou $\frac{\rho_1}{\rho_{a1}}$ obtido, traçar uma linha paralela ao eixo da abcissa cortando as curvas distintas de K;
- Multiplicar todos os valores encontrados de $\frac{h}{a}$ pelo valor de a_1 determinado anteriormente. Construir uma tabela com os valores de K, $\frac{h}{a}$ e a_1 .
- Plotar a curva de K x h da tabela.
- Escolher um novo espaçamento a_2 e repetir o processo para construir uma nova curva K x h.
- A interseção das curvas K x h num dado ponto resultará nos valores reais de K e h, definindo a estratificação.

4.3 Método Simplificado para Estratificação do Solo em Duas Camadas

Este método oferece resultados razoáveis somente quando o solo puder ser estratificado em duas camadas e a curva ρ x a obtida após a realização das medidas através do método de Wenner possuir uma das formas típicas indicadas na Figura 23 com uma considerável tendência de saturação assintótica nos extremos e paralela ao eixo das abcissas (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Figura 23 – Curva ρ x a típicas de solos de duas camadas.

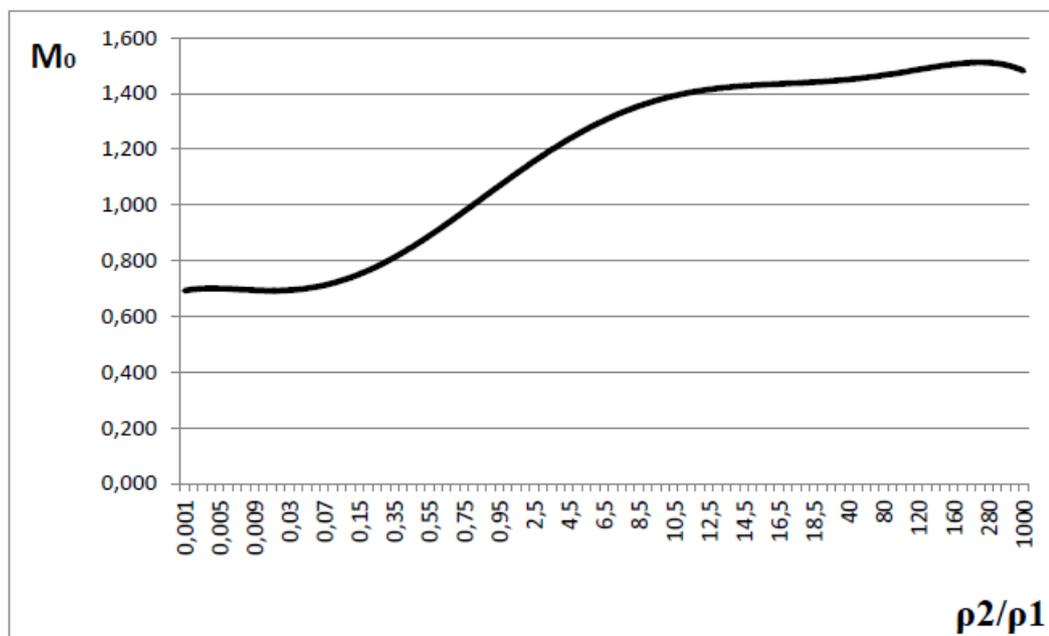


Fonte:(NBR, 7117:2011).

Determina-se as resistividades e profundidades seguindo as etapas subsequentes:

- Prolongar a curva ρ x a até interceptar o eixo das ordenadas, obtendo o valor da resistividade ρ_1 da primeira camada do solo;
- Traçar a assíntota à curva ρ x a e prolongá-la até o eixo das ordenadas, obtendo o valor da resistividade ρ_2 da segunda camada do solo;
- Calcular a relação ρ_2/ρ_1 e determinar o valor de M_0 na Figura 24;
- Calcular $\rho_m = M_0 \times \rho_1$;
- Localizar ρ_m na curva ρ x a para obter a profundidade h da primeira camada do solo.

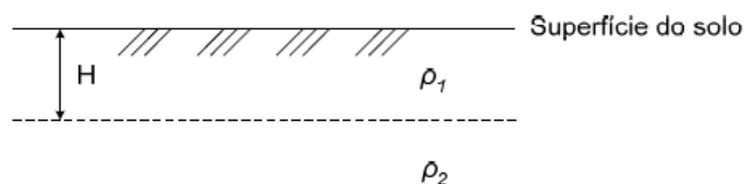
Figura 24 – M_0 em função de ρ_2/ρ_1 .



Fonte: (DIAS, 1996).

Após realizar as etapas do Método Simplificado descritas anteriormente, obtém-se o valor da resistividade da primeira camada ρ_1 e da segunda camada ρ_2 , bem como a profundidade h da primeira camada.

Figura 25 – Modelo de duas camadas.



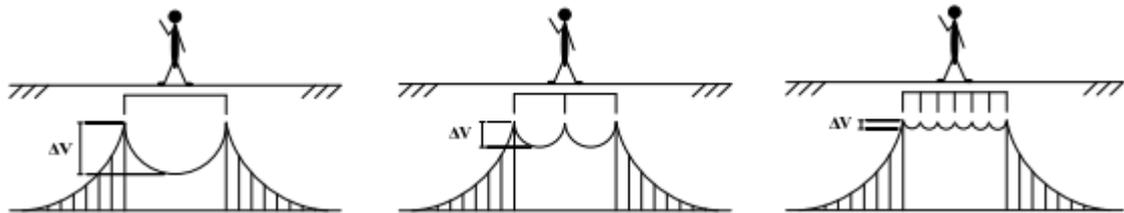
Fonte: (RAGGI, 2009).

4.4 Potenciais de Segurança

Um projeto de malha de aterramento bem elaborado deve preservar a integridade das pessoas, principalmente em relação aos limites dos potenciais de toque e de passo (FLEURY; GUEDES, 2015). Além disso, é fundamental obter um baixo valor de resistência para prover um caminho de baixa impedância para uma corrente de falta ou descarga atmosférica.

Um parâmetro importante no projeto das malhas de aterramento para que os máximos valores de gradiente não sejam excedidos é a dimensão das malhas básicas (i.e. reticulados), visto que, quanto maior for a malha básica, maior será a elevação de potencial no interior da malha (CUNHA, 2003). Na Figura 26 está ilustrada a variação de potencial em relação à dimensão da malha básica.

Figura 26 – Ilustração da variação de potencial de acordo com o tamanho do reticulado.



Fonte: (DIAS, 2011).

Segundo pesquisas realizadas por Dalziel (1941), 99,5% das pessoas podem suportar a passagem de uma corrente elétrica de amplitude e duração determinada pela Equação (4.3) sem a ocorrência de fibrilação ventricular. A expressão é usada para obtenção do limite permissível e aceitável de corrente para que não ocorra fibrilação durante o tempo que a pessoa fica submetida a uma diferença de potencial.

$$I_{choque} = \frac{k}{\sqrt{t}} \quad (4.3)$$

Onde:

- I_{choque} - Corrente elétrica máxima que não causa fibrilação no corpo humano.
- k - Constante relacionada à energia de choque elétrico tolerada por percentual da população com uma determinada massa corpórea. Uma pessoa com 50 kg $k = 0,116$, já para uma pessoa com 70 kg $k = 0,157$ (IEEE-80, 2000).
- t - Tempo da duração de choque.

Sendo assim, a malha de aterramento deve garantir que, na região onde se encontram os equipamentos e pessoas, os valores dos potenciais gerados por uma corrente de falta ou descarga atmosférica estejam dentro dos limites aceitáveis.

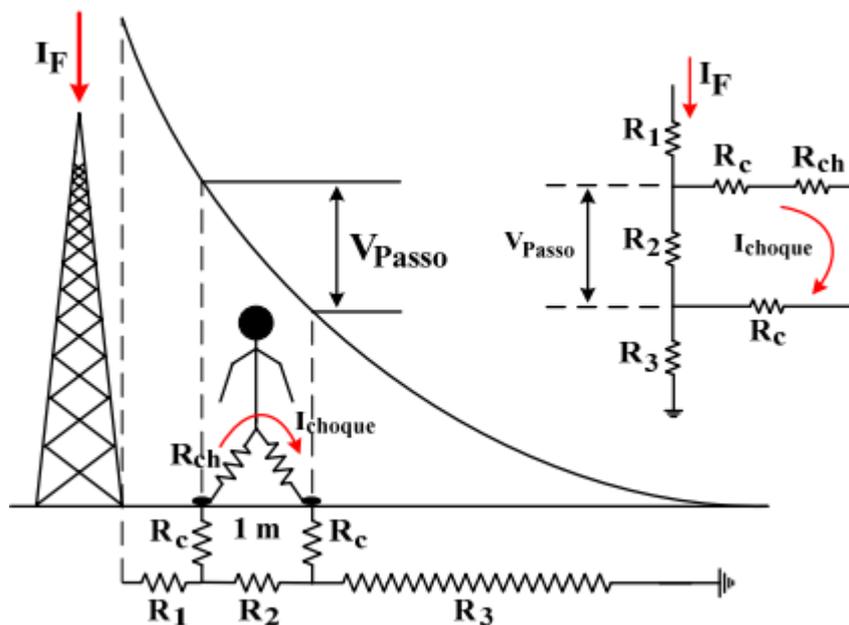
4.4.1 Potencial de Passo

O potencial de passo é a diferença de potencial existente entre dois pontos situados no solo e distanciados de 1m devido a passagem de corrente de curto circuito pela terra (IEEE-80, 2000).

Na Figura 27 é apresentado um esquema de como se obter a expressão do potencial de passo em relação à corrente de choque, em que:

- R_{ch} - Resistência do corpo humano, que é considerada de 1,0 k Ω , conforme mencionado em IEEE-80 (2000).
- R_c - Resistência de contato que pode ser considerada igual a $3\rho_s$ (resistividade superficial do solo), conforme citado em IEEE-80 (2000).
- R_1, R_2, R_3 - Resistências dos trechos de terra considerados.
- I_{choque} - Corrente que percorre o corpo humano.

Figura 27 – Esquema de potencial de passo.



Fonte: (DIAS, 2011).

A expressão para o potencial de passo máximo permissível será dada pela Equação (4.5), em que I_{choque} é dada pela (4.3) a fim de que o potencial de passo máximo não cause fibrilação ventricular. Na prática, os valores medidos devem ser menores do que os valores determinados pelos limites de segurança.

$$V_{passo} = (R_{ch} + 2R_c)I_{choque} \quad (4.4)$$

$$V_{passomaximo} = (1000 + 6\rho_s) \frac{k}{\sqrt{t}} \quad (4.5)$$

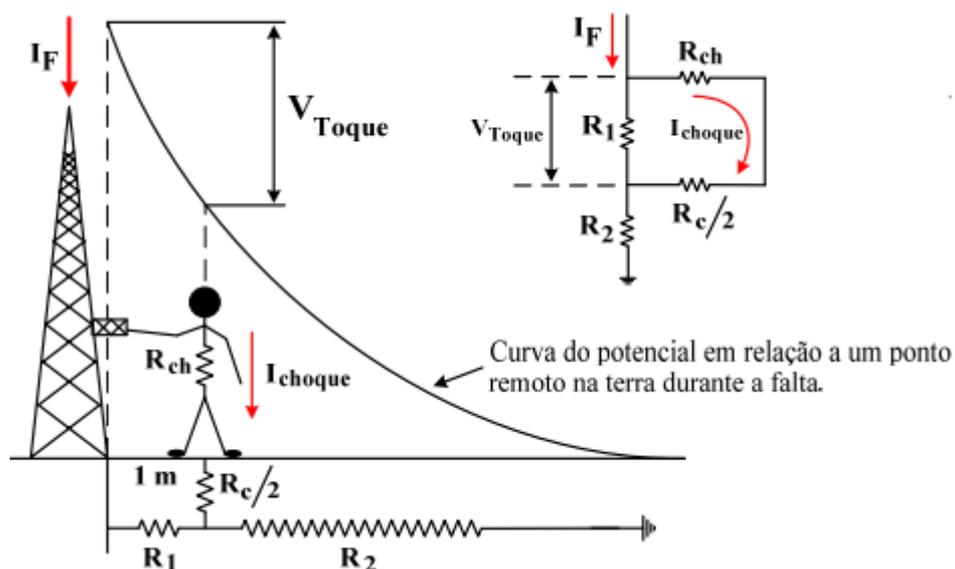
4.4.2 Potencial de Toque

O potencial de toque é a diferença de potencial existente entre um determinado ponto de uma estrutura metálica, situada ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1 m da base da estrutura em questão (IEEE-80, 2000). Por consequência tem-se a passagem de corrente pelo corpo humano que dependendo da sua duração e intensidade, pode gerar alto risco a pessoa. O potencial máximo gerado por um aterramento durante o período de defeito não deve produzir uma corrente de choque superior à limitada pela (4.3).

Na Figura 28 está representado um esquema de como se obter a expressão do potencial de toque em relação à corrente de choque, em que:

- R_{ch} - Resistência do corpo humano, que é considerada de 1,0 k Ω , conforme mencionado em IEEE-80 (2000).
- R_c - Resistência de contato que pode ser considerada igual a $3\rho_s$ (resistividade superficial do solo), conforme citado em IEEE-80 (2000).
- R_1 e R_2 - Resistências dos trechos de terra considerados.
- I_{choque} - Corrente que percorre o corpo humano.

Figura 28 – Esquema de potencial de toque.



Fonte: (DIAS, 2011).

A expressão para o potencial de toque será dado pela Equação (4.7), em que I_{choque} é dada pela (4.3) a fim de que o potencial de toque máximo permissível não cause fibrilação ventricular. Na prática, os valores medidos devem ser menores do que os valores determinados pelos limites de segurança.

$$V_{toque} = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) I_{choque} \quad (4.6)$$

$$V_{toquemaximo} = (1000 + 1,5\rho_s) \frac{k}{\sqrt{t}} \quad (4.7)$$

4.5 Procedimento de Projeto de Malha de Aterramento em Subestações

O dimensionamento de uma malha de terra é um processo iterativo. A partir de uma malha inicial são verificados os potenciais de segurança, se os valores máximos suportáveis pelo ser humano não forem atendidos é necessário modificar o projeto até satisfazer as condições exigidas.

Os procedimentos de projeto estão descritos em passos apresentados nos parágrafos seguintes.

Passo 1: Entrada dos dados básicos de projeto

De acordo com Raggi (2009), os dados de entrada do projeto são, basicamente, modelo de solo utilizado, a corrente máxima a percorrer o aterramento, o tempo máximo de atuação da proteção e a área disponível para instalação da malha.

Estratificação do Solo: Feita para definir o modelo do solo a partir das medições de resistividade em diversos pontos no terreno onde será implementado a malha de aterramento. Isto para determinar as características das camadas (resistividades e profundidades).

Corrente de falta máxima que percorrerá o aterramento: Ainda segundo Raggi (2009), é necessário definir a parcela da corrente de falta que escoar pelo solo através da malha. Quando há ocorrência de uma falta de curta duração para a terra, a corrente de falta, inicialmente injetada na malha de aterramento, se dividirá por todo este sistema interligado, cabendo a cada um dos seus componentes a função de escoar uma fração dessa corrente. Considera-se, nesta estimativa, um caso de falta para terra crítico que resulte na maior corrente possível a percorrer o aterramento.

Área necessária para instalação da malha: Definida por dois fatores - tamanho da área disponível e valores desejáveis de resistência de aterramento e distribuição de potencial para aquela subestação. Baixos valores de resistência de aterramento desejáveis implicam em maiores áreas para disposição dos eletrodos de aterramento (RAGGI, 2009).

Ainda de acordo com Raggi (2009), uma estimativa inicial da área necessária para se atingir uma resistência de aterramento R é obtida pela seguinte formulação.

$$R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (4.8)$$

Sendo que A é a área da malha de aterramento e ρ é um valor aproximado para a resistividade do solo, considerando-se um meio uniforme. Obtém-se uma primeira aproximação da área para a área requerida:

$$A = \frac{\rho^2 \pi}{16R^2} \quad (4.9)$$

Passo 2: Determinação da corrente máxima tolerável pelo corpo humano e das tensões de passo e de toque admissíveis

Raggi (2009) afirma, na ocorrência de uma falta, para determinar os valores máximos de corrente que podem percorrer o corpo humano, acometido por uma diferença de potencial na região do aterramento, deve-se considerar o tempo máximo para supressão da falha ou defeito, ou seja, o tempo de atuação da proteção. A partir desta corrente, são determinados os valores máximos de tensão de toque e de passo admissíveis naquela região, sendo estes parâmetros responsáveis por definirem a resistência de aterramento e a distribuição de potenciais na superfície do solo a serem atendidas pela malha.

Passo 3: Proposta de arranjo inicial de eletrodos

O arranjo deve partir de uma configuração inicial contendo um condutor no entorno da área a ser aterrada, adicionando-se condutores adicionais que se cruzam formando um reticulado.

Passo 4: Avaliação da resistência de aterramento, da distribuição de potenciais no solo e da elevação de potencial da malha (GPR - Ground Potential Rise) obtidos com a configuração sugerida

Nessa etapa, o projetista deve contar com o auxílio de um programa computacional que permite as seguintes entradas: modelo do solo (parâmetros da estratificação), arranjo dos eletrodos de aterramento e a corrente que efetivamente flui pela malha. Feito isso, o *software* calcula a resistência de aterramento e a distribuição de potencial na superfície do solo. O GPR é dado pela multiplicação do valor da resistência de aterramento pela corrente injetada.

Caso o GPR e as tensões de passo e de toque obtidos para o arranjo proposto excedam os potenciais máximos admissíveis, deve ser feita mudanças na configuração da malha.

Para alcançar potenciais menores pode ser feita adição de condutores ou redução no espaçamento dos mesmos no interior da malha, além disso, adicionar hastes de aterramento nas delimitações da malha ou mesmo na sua parte interna.

5 Material e Métodos

5.1 Caracterização de Área

A definição da área para realização das medições de resistividade do solo foi feita através dos seguintes critérios: Terreno amplo com possibilidade de instalação de várias empresas, local aberto e de fácil acesso.

As medições de resistividade do solo utilizando o arranjo de Wenner foram realizadas em uma área situada na cidade de João Monlevade, MG. Conforme mostra a Figura 29, é importante ressaltar que alguns pontos da área estudada sofreram compactação, acréscimo e retirada de material, similarmente ao que ocorre em áreas onde geralmente são instaladas malhas de aterramento.

Figura 29 – Área onde foram realizadas medições.



Fonte: Google Earth.

A classe de solo predominante é o Latossolo Vermelho-amarelo, caracterizado por boa drenagem, muito profundo e cor uniforme ao longo de seu perfil assim como sua textura. A área estudada apresenta granulometria arenosa devido a exposição do horizonte C, grande suscetibilidade de erosão, baixa presença de vegetação e matéria orgânica. É válido salientar que o solo sofreu compactação mecânica, afetando sua porosidade, isto é, reorganização das partículas que passam a usar menos espaços, dificultando a drenagem ocasionando trincas e sulcos.

5.2 Medições em Campo

A medição foi feita usando o medidor digital de resistividade de solo da marca Instrum, modelo ITTMD 20KW. O aparelho foi aferido conforme o manual de instruções e se enquadrou dentro das especificações técnicas exigidas.

Durante a realização do trabalho de campo foram coletadas as resistividades de solo de 30 pontos. A distribuição dos pontos de coleta deu-se de forma aleatória.

Em cada ponto adotou-se duas linhas de medição, conforme mostra a Figura 30, sempre mantendo o aparelho ao centro. Para cada linha coletou-se três leituras referentes ao espaçamento entre hastes de 2,0 metros, 4,0 metros e 8,0 metros. Repetiu-se o processo para a segunda linha de medição (medição cruzada), totalizando seis leituras para cada ponto medido. Em todas as medições a profundidade das hastes foi de 20cm, respeitando a condição de que a profundidade deve ser menor ou igual a 10% do espaçamento entre as hastes.

A leitura obtida pelo aparelho indica o valor da resistência do sistema, sendo necessário aplicar a Equação (3.26) para obter o valor de resistividade do solo naquele ponto.

Figura 30 – Medida de resistividade do solo.

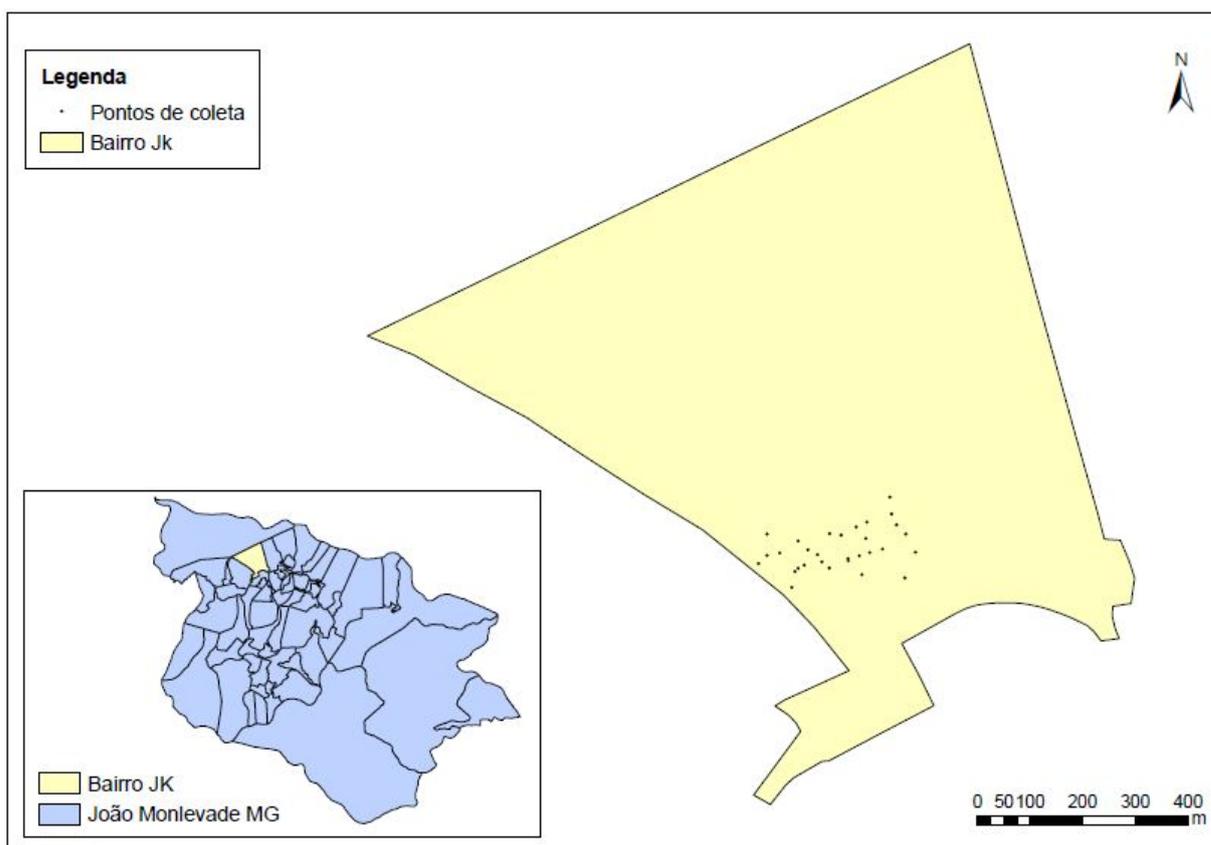


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Georreferenciamento dos Pontos

Juntamente com a medição realizada da resistividade do solo, foram coletadas as coordenadas geográficas dos 30 pontos. De posse desses dados, em ambiente SIG, foi projetado e georreferenciado as informações, resultando no mapa de localização.

Figura 31 – Mapa de localização do pontos coletados.



Fonte. Elaborado pelo autor

5.4 CYMGRD

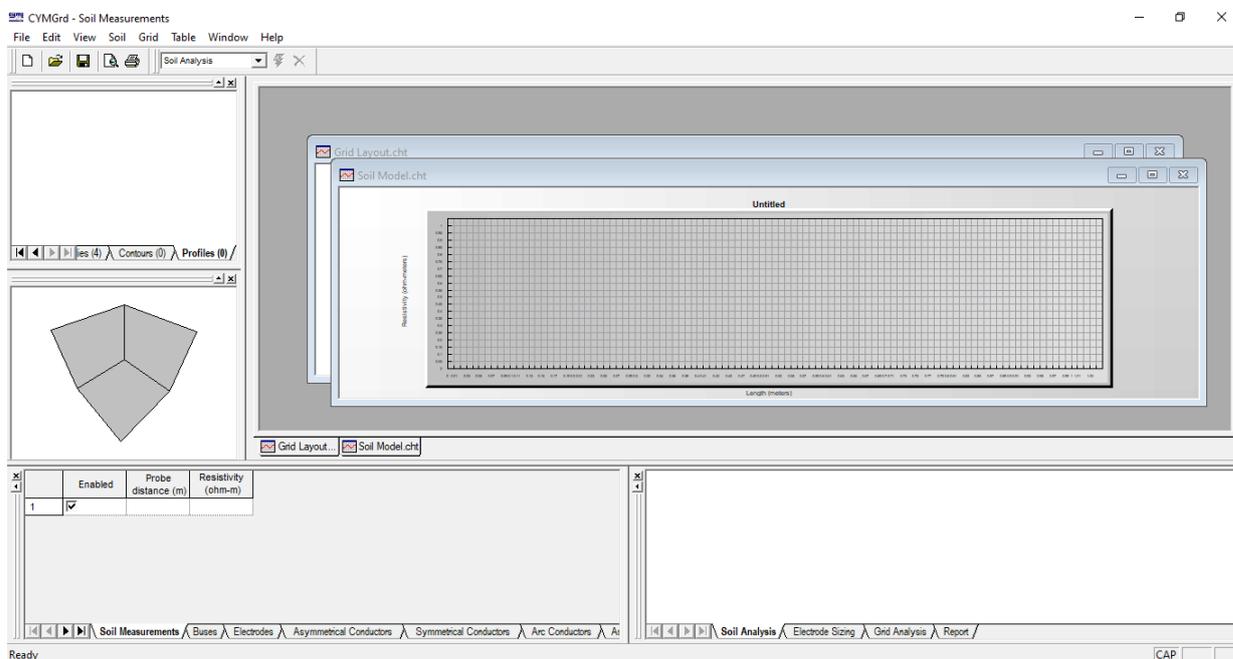
O CYMGRD é um *software* originado nos Estados Unidos utilizado para desenvolvimento de projetos e análise de malhas de terra.

O programa possui os seguintes recursos: análise, modelamento e estratificação do solo em duas camadas a partir de medições em campo; importação e exportação de arranjos de malha de terra elaborado diretamente no AutoCAD; cálculo de potenciais de passo e toque.

Os resultados são apresentados de forma gráfica e numérica, permite visualização dos gradientes de potencial em forma de perfil em duas e três dimensões. O *software* permite que o projetista faça uma análise completa dos parâmetros necessários para o dimensionamento eficiente e econômico da malha de terra.

No presente trabalho, o CYMGRD será usado como ferramenta para realizar a estratificação do solo a partir dos valores de resistividade média de todos os pontos da Tabela 7.

Figura 32 – Página inicial *software* CYMGRD .



Fonte. CYMGRD

Para realizar a estratificação baseado no método de duas camadas, no canto inferior esquerdo da Figura 32, são adicionados os espaçamentos das medidas feitas em campo (foram adotados: 2m, 4m, 8m) e resistividades calculadas através das resistências medidas. Como resultado da estratificação, no canto superior direito, são apresentados os resultados de forma gráfica (Vide Figura 38) e no canto inferior direito os resultados numéricos (Vide Figura 39).

Adiante, o *software* será a ferramenta usada para simulação de malha de aterramento em subestação.

O CADgrd é um aplicativo desenvolvido para autoCAD, que possibilita o desenho da malha de terra diretamente no autoCAD. Após a elaboração do desenho e inserção dos dados dos condutores, deve-se validar e importar o arquivo gerado para o módulo principal do CYMGRD.

Após a validação, o usuário deverá inserir nos parâmetros de solo, os valores de resistividade da primeira e segunda camada, tempo de duração de choque elétrico, peso corporal da pessoa escolhida, profundidade da malha e resistividade da camada superficial. Deve-se definir também a corrente de curto circuito e o modelo do eletrodo.

Após a inserção dos dados pertinentes, poderá proceder à simulação da malha, nessa etapa, para auxiliar o projetista na análise dos resultados, é fornecido o diagrama

de contorno, em que se permite visualizar a distribuição de potenciais no solo e o diagrama de perfil, que permite visualizar o gradiente de tensão na superfície do solo.

6 Resultados e Discussões

6.1 Resultados das Medições

A Tabela 7 mostra os registros das coordenadas geográficas dos 30 pontos estudados, valores de resistências referentes a duas medições realizadas em cada ponto e, por fim, o cálculo do desvio padrão entre as medidas de resistência de cada ponto.

É importante ressaltar que no ponto 14 houve um erro de medição relacionado a uma das duas direções aplicadas ao espaçamento de 2m, portanto, decidiu-se abandonar a medição para tal espaçamento.

Tabela 7 – Dados obtidos a partir do levantamento de campo.

Ponto	Coordenada Geográfica		Resistência Medida (Ω)			Desvio Padrão		
			2m	4m	8m	2m	4m	8m
1	-19.806790	-43.185563	92,4 105,1	41,4 81,2	15,0 23,6	6,35	19,9	4,3
2	-19.806980	-43.185470	38,0 40,1	12,5 4,1	4,3 2,7	1,05	4,2	0,8
3	-19.807139	-43.185305	17,9 19,0	8,1 3,5	7,9 10,9	0,55	2,3	1,5
4	-19.806935	-43.186005	174,9 138,0	77,0 28,5	20,2 11,8	18,45	24,25	4,2
5	-19.807022	-43.186201	188,2 159,4	101,1 144,2	78,5 39,8	14,4	21,55	19,35
6	-19.807167	-43.186477	197,4 193,5	182,4 121,1	37,8 55,1	1,95	30,65	8,65
7	-19.807142	-43.186668	267,0 207,0	136,3 140,8	39,9 12,8	30	2,25	13,55
8	-19.807431	-43.187079	114,0 129,5	44,9 41,2	1,82 7,5	7,75	1,85	2,84
9	-19.807277	-43.187253	92,7 83,9	40,0 24,4	10,7 3,3	4,4	7,8	3,7
10	-19.807492	-43.187583	60,3 90,5	15,3 17,7	12,4 7,6	15,1	1,2	2,4
11	-19.807534	-43.187819	90,5 85,4	65,2 70,4	23,8 27,4	2,55	3,1	1,8
12	-19.807677	-43.187971	80,2 77,4	53,3 61,2	52,9 44,0	1,4	3,95	4,45
13	-19.807165	-43.187821	685,9 607,7	571,2 514,3	363,0 407,2	39,1	28,45	22,1
14	-19.807403	-43.185714	397,0	167,4 163,6	184,0 178,3		1,9	2,85
15	-19.807471	-43.185950	267,0 186,6	119,5 54,6	23,6 36,5	40,2	32,45	6,45
16	-19.807223	-43.186027	86,0 91,2	81,4 70,2	18,7 31,3	2,6	5,6	6,3
17	-19.807523	-43.186139	212,0 239,0	103,7 84,5	64,5 28,2	13,5	9,6	18,15
18	-19.807613	-43.186337	276,0 225,0	112,0 60,0	66,2 65,0	25,5	26	0,6
19	-19.807737	-43.186902	113,9 91,3	45,5 53,7	52,0 38,6	11,3	4,1	6,7
20	-19.807516	-43.186902	388,0 297,8	133,6 167,8	38,0 64,6	45,1	17,1	13,3
21	-19.808236	-43.187623	123,6 99,2	46,1 54,5	24,9 31,2	12,2	4,2	3,15
22	-19.806584	-43.186356	249,0 189,5	122,4 139,2	69,9 87,4	29,75	8,4	8,75
23	-19.806891	-43.186829	345,0 297,9	186,2 142,2	79,2 87,3	23,55	22	4,05
24	-19.806841	-43.187145	116,9 140,6	72,9 89,0	76,3 68,4	11,85	8,05	3,95
25	-19.808132	-43.187243	171,8 156,4	114,8 92,3	28,4 47,9	7,7	11,25	9,75
26	-19.808406	-43.187299	38,1 30,6	24,7 22,8	1,31 5,39	3,75	0,95	2,04
27	-19.808041	-43.186085	31,0 43,5	47,2 28,8	11,6 17,8	6,25	9,2	3,1
28	-19.807710	-43.185317	187,4 144,4	72,9 83,8	52,3 62,5	21,5	5,45	5,1
29	-19.807455	-43.185126	167,2 124,6	62,5 89,6	54,8 50,2	21,3	13,55	2,3
30	-19.806502	-43.185599	297,0 214,8	130,5 187,8	164,8 122,0	41,1	28,65	21,4

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir do cálculo do desvio padrão entre as medidas de resistência de cada ponto não verificou-se nenhum valor de resistência superior a 50% em relação ao valor médio das medições feitas. Feito isso, calculou-se a resistência média entre as medidas realizadas em cada espaçamento e, por fim, obteve-se o valor de resistividade aplicando a Equação (3.26), tendo seus valores mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores calculados de resistividade de solo.

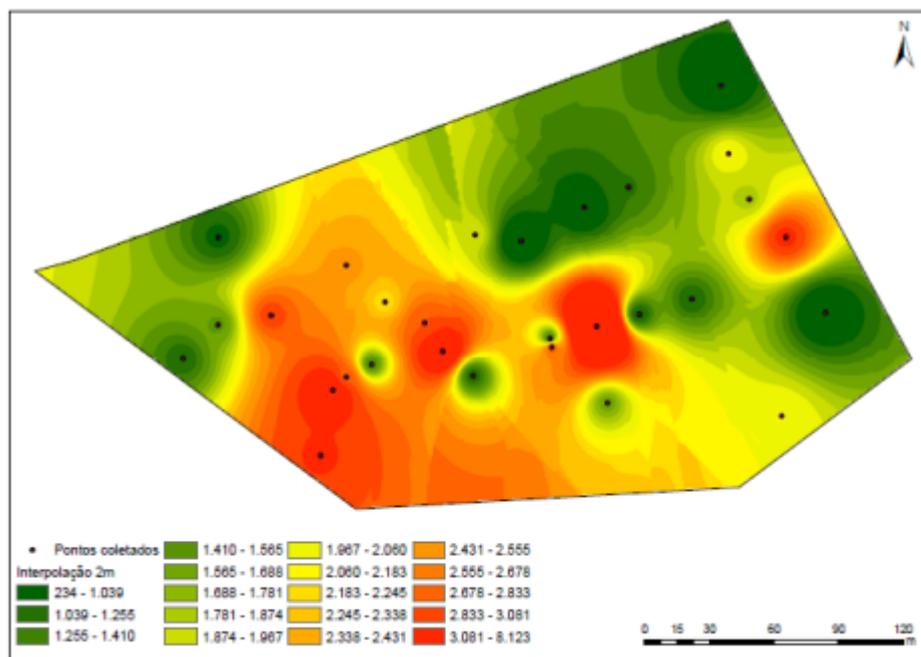
Ponto	Resistência Média (Ω)			Resistividade média ($\Omega.m$)		
	2m	4m	8m	2m	4m	8m
1	98,7	61,3	19,3	1240,9	1540,6	970,1
2	39,0	8,3	3,5	490,7	208,6	175,9
3	18,4	5,8	9,4	231,8	145,7	472,4
4	156,4	52,7	16,0	1966,0	1325,7	804,2
5	173,8	122,6	59,1	2184,0	3082,5	2973,2
6	195,4	151,7	46,4	2456,0	3813,8	2334,8
7	237,0	138,5	26,3	2978,2	3482,1	1324,4
8	121,7	43,0	4,6	1529,9	1081,9	234,2
9	88,3	32,2	7,0	1109,6	809,2	351,8
10	75,4	16,5	10,0	947,5	414,6	502,6
11	87,9	68,3	25,6	1105,2	1716,5	1286,7
12	78,8	57,2	48,4	990,2	1438,8	2435,3
13	646,8	542,7	385,1	8127,9	13640,7	19357,2
14	341,7	165,5	181,1	4294,5	4159,4	9105,5
15	226,8	87,0	30,0	2850,0	2187,8	1510,4
16	88,6	75,8	25,0	1113,3	1905,0	1256,6
17	225,5	94,1	46,3	2833,7	2364,9	2329,8
18	250,5	86,0	65,6	3147,8	2161,4	3297,4
19	102,6	49,6	45,3	1289,3	1246,5	2277,0
20	342,9	150,7	51,3	4309,0	3787,5	2578,6
21	111,4	50,3	28,0	1399,8	1264,1	1409,9
22	219,2	130,8	78,6	2755,1	3287,3	3953,3
23	321,4	164,2	83,2	4039,4	4126,7	4184,6
24	128,7	80,9	72,3	1617,9	2034,4	3636,7
25	164,1	103,5	38,1	2062,1	2602,4	1917,6
26	34,3	23,7	3,3	431,6	596,9	168,3
27	37,2	38,0	14,7	468,0	955,0	738,9
28	165,9	78,3	57,4	2084,7	1969,1	2885,2
29	145,9	76,0	52,5	1833,4	1911,3	2638,9
30	255,9	159,1	143,4	3215,7	3999,8	7208,0

Fonte: Elaborado pelo autor

6.2 Geração de Mapas

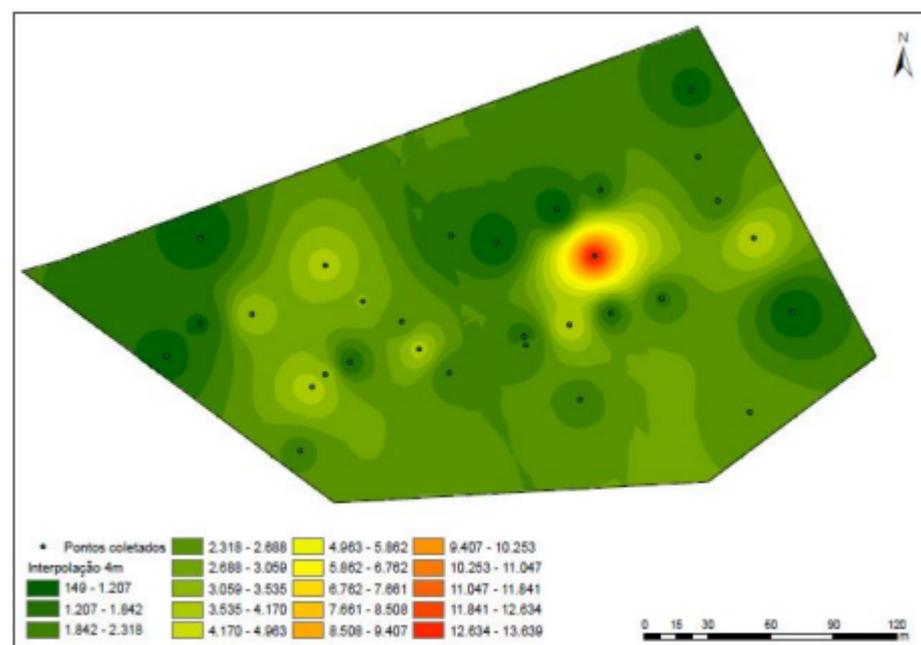
Com o auxílio do software ArcGIS, utilizou-se interpolação pelo método de Inverso Ponderado da Distância para geração de mapas com espaçamento de 2m, 4m e 8m. O mapa com espaçamento em 2m representado na Figura 33 possui 29 pontos devido à exclusão do ponto 14 por erro de medição.

Figura 33 – Mapa de resistividade com espaçamento 2,0m.



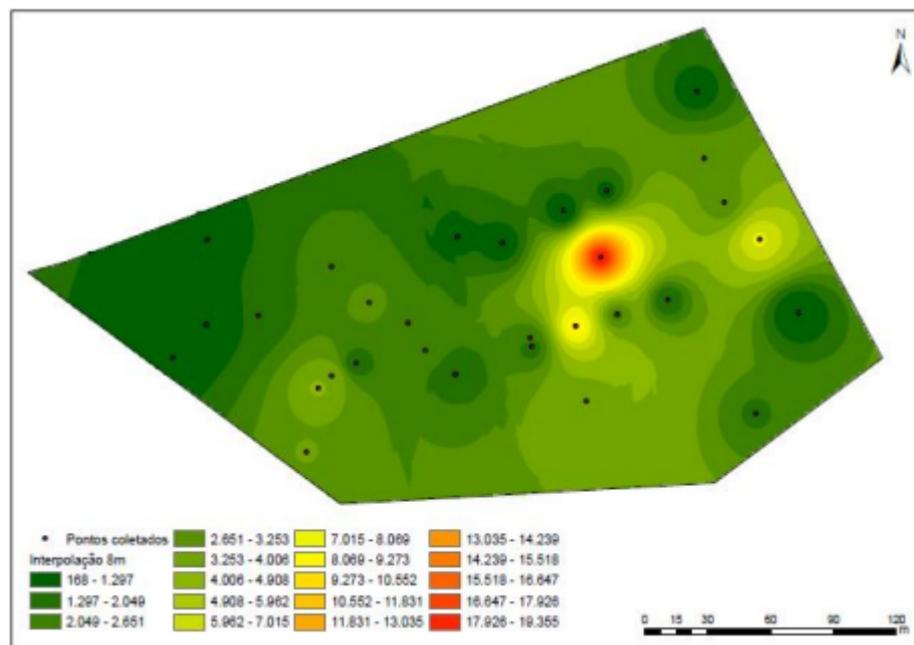
Fonte. Elaborado pelo autor

Figura 34 – Mapa de resistividade com espaçamento 4,0m.



Fonte. Elaborado pelo autor

Figura 35 – Mapa de resistividade com espaçamento de 8,0m.



Fonte. Elaborado pelo autor

É importante salientar que o método de medição aplicado no trabalho considera que 58% da corrente injetada pelo equipamento flui a uma profundidade igual ao espaçamento adotado entre as hastes, ou seja, quanto menor o espaçamento entre as hastes, mais superficialmente a corrente se distribui.

Seguindo o raciocínio do parágrafo anterior, observa-se que o mapa da Figura 33 cujo espaçamento é 2m possui uma maior variação da resistividade entre pontos adjacentes comparado aos gráficos de 4m e 8m. Além disso, possui uma área mais extensa onde a resistividade mais alta predomina, isso pode ser resultado da compactação mecânica que houve no terreno naquela área e pelo fato da primeira camada do solo estar mais seca.

Nos mapas da Figura 34 e 35 desconsiderando-se o ponto margeado em vermelho onde a resistividade é a mais alta, observa-se pouca variação da resistividade nos demais pontos dos dois mapas, havendo uma certa uniformidade da distribuição da resistividade.

6.3 Estratificação do Solo

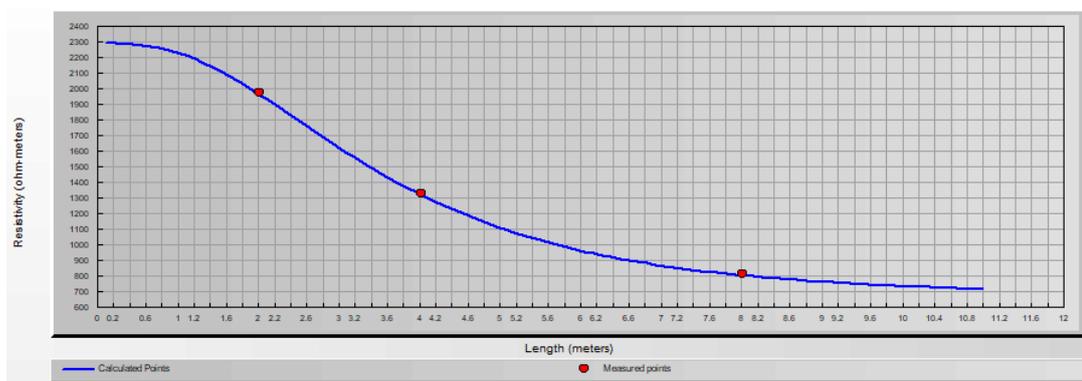
Para fins de projeto de aterramento um sistema com duas camadas se mostra suficiente, alguns estudos indicam que em grande parte das instalações as correntes que são injetadas no solo tendem a percorrer a camada mais superficial do solo.

Baseado no Método de Estratificação do solo em duas camadas, o *software* CYMgrid fornece a resistividade da primeira camada ρ_1 , da segunda camada ρ_2 e a profundidade

h da primeira camada. Foi realizado a estratificação do solo nos 30 pontos coletados em campo, como mostra a Tabela 9.

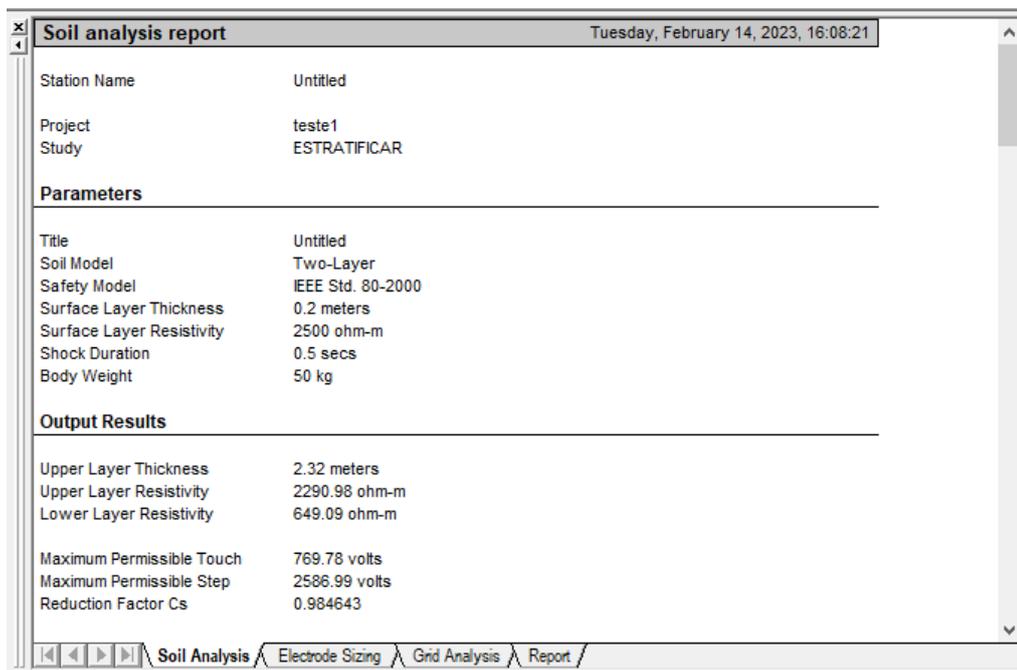
Para efeito de exemplificação do método aplicado pelo *software*, a Figura 36 mostra o resultado gráfico da estratificação do solo usando as resistividades e seus respectivos espaçamentos no ponto 4 da Tabela 8. Observa-se que a curva traçada atinge todos os pontos do gráfico $\rho \times a$, obtendo o valor das variáveis ρ_1 , ρ_2 e h com erro igual a zero. A Figura 37 mostra os resultados numéricos fornecidos após a estratificação do ponto 4. Já a Figura 38 mostra uma curva gerada ascendente com os resultados das variáveis geradas com erro mínimo do ponto 22 da Tabela 8.

Figura 36 – Curva de estratificação do solo levantada pelo *software* CYMgrd no ponto 4 da Tabela 8.



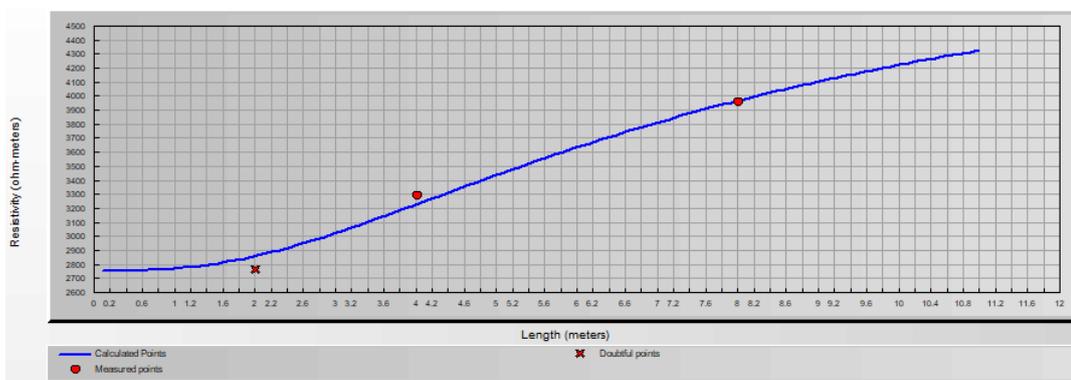
Fonte: CYMgrd.

Figura 37 – Resultado numérico obtido pelo *software* CYMgrd no ponto 4 da Tabela 8.



Fonte: CYMgrd.

Figura 38 – Curva de estratificação do solo levantada pelo *software* CYMgrd no ponto 22 da Tabela 8.

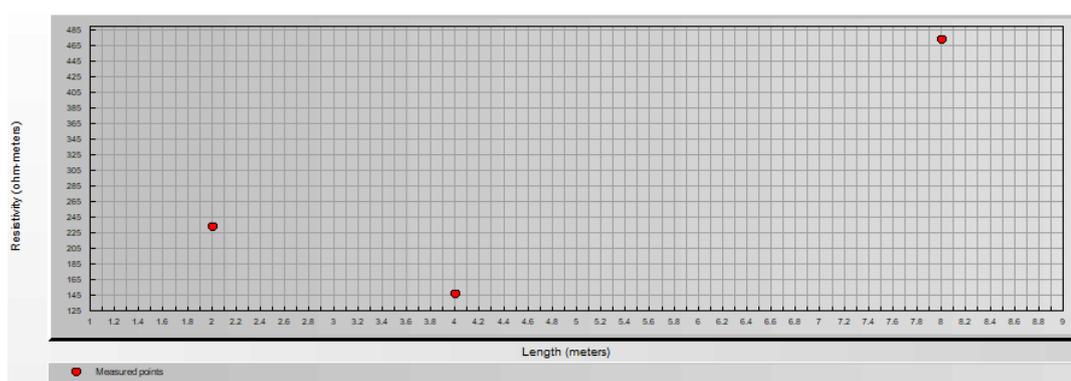


Fonte: CYMgrd.

Adiante, quando o gráfico $\rho \times a$ gerado pelo *software* não apresenta comportamento ascendente ou descendente, o *software* acusa "ERRO" e apresenta uma mensagem afirmando que a resistividade da segunda camada fica acima de 100.000 ohm-m. A Figura 39 exemplifica essa situação, o valor de resistividade respectivo ao espaçamento de 4m é menor do que o valor de resistividade referente ao espaçamento de 2m, dessa forma, o *software* não consegue traçar uma curva com característica ascendente interceptando ou se aproximando de todos os pontos, impossibilitando a realização da estratificação do solo.

Para evitar a situação descrita no parágrafo anterior, é interessante levantar medições em campo de resistividade de solo com o maior número de espaçamentos possível, dessa forma, ao levantar a curva $\rho \times a$, há uma possibilidade maior de interceptar ou se aproximar de todos os pontos do gráfico.

Figura 39 – Resultado de estratificação do solo pelo *software* CYMgrd no ponto 3 da Tabela 8.



Fonte: CYMgrd.

Tabela 9 – Resultados de estratificação do solo.

Ponto	ρ_1 (Ω m)	ρ_2 (Ω m)	h (m)
1	1373,44	0,07	8,6
2	511,17	130,77	2,0
3	ERRO	ERRO	ERRO
4	2290,98	649,09	2,32
5	2081,77	3528,55	2,0
6	2456,0	2657,53	2,0
7	3415,12	0,17	5,23
8	1784,87	0,09	3,31
9	1200,04	139,98	3,5
10	852,53	347,4	2,0
11	1105,0	1499,36	2,0
12	856,54	8849,01	2,97
13	6319,13	38725,4	2,0
14	ERRO	ERRO	ERRO
15	3135,33	1227,72	2,57
16	1113,0	1481,76	2,0
17	2833,0	2187,13	2,0
18	ERRO	ERRO	ERRO
19	ERRO	ERRO	ERRO
20	4309,01	904,5	5,42
21	1399,0	1323,32	2,0
22	2754,99	5320,17	3,42
23	4039,0	4208,06	2,0
24	ERRO	ERRO	ERRO
25	2062,0	2100,69	2,0
26	514,01	0,03	4,81
27	444,74	995,68	2,0
28	ERRO	ERRO	ERRO
29	ERRO	ERRO	ERRO
30	ERRO	ERRO	ERRO

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4 Simulação Malha de Aterramento

A partir da escolha do ponto 10 na Tabela 9, foi utilizado seus respectivos resultados de estratificação do solo para realizar simulação de uma malha de terra com o auxílio do *software* CYMgrid. O valor da constante k para uma pessoa com 50 kg possui valor $k = 0,116$ (IEEE-80, 2000).

Tabela 10 – Dados iniciais para simulação de malha de aterramento.

Descrição	Quantidade	Unidade
Profundidade da malha	0,5	m
Resistividade da 1ª Camada	852,53	$\Omega.m$
Resistividade da 2ª Camada	347,4	$\Omega.m$
Resistividade Superficial do Solo (camada de brita)	3.000	$\Omega.m$
Profundidade da 1ª Camada	2,0	m
Corrente de Curto Fase-Terra Máxima	1	kA
Tempo de atuação da proteção	0,5	s

Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante destacar que o tempo de atuação da proteção vai impactar diretamente no valor da corrente máxima tolerável pelo corpo humano na ocorrência de uma falta na região do aterramento, como mostra a Equação 4.3. A partir desta corrente, serão determinados os valores máximos de tensão de toque e tensão de passo admissíveis.

6.4.1 Estimativa da Área Mínima da Malha

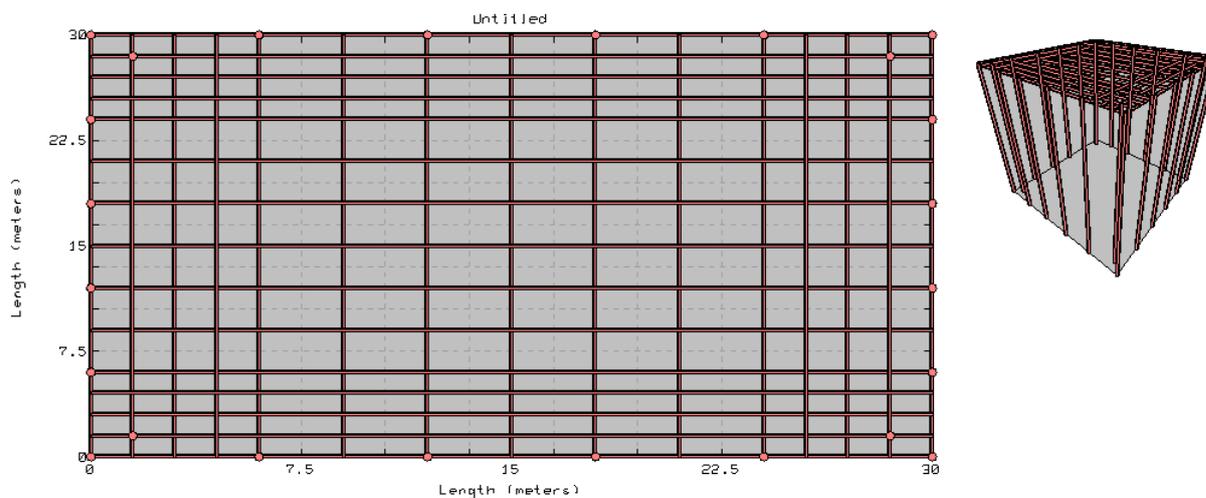
Substituindo ρ pelo valor da resistividade da primeira camada 852,53 $\Omega.m$ e considerando uma resistência de aterramento $R=10 \Omega$ e substituindo na Equação (4.9), temos:

$$A = \left(\frac{852,53}{16 * 10} \right)^2 \pi = 89,14m^2 \quad (6.1)$$

6.4.2 Design da Malha

O processo para construção da malha é iterativo, como dito anteriormente. A partir de vários testes, foi escolhido uma malha de terra de dimensões 30x30m, cuja área é 900m² que atende a estimativa da área inicial. Optou-se pela adição de um total de 24 hastes de aço cobreado de $\frac{3}{4}$ polegada de espessura e 3 metros de comprimento nas extremidades da malha. Foram usados um total de 900m de condutor de cobre trefilado formando um reticulado.

Figura 40 – Design da malha de terra em 2D e 3D.



Fonte: CYMgrid.

Na etapa final do projeto é feita a avaliação da resistência de aterramento e potenciais máximos permitidos obtidos com a configuração da malha adotada.

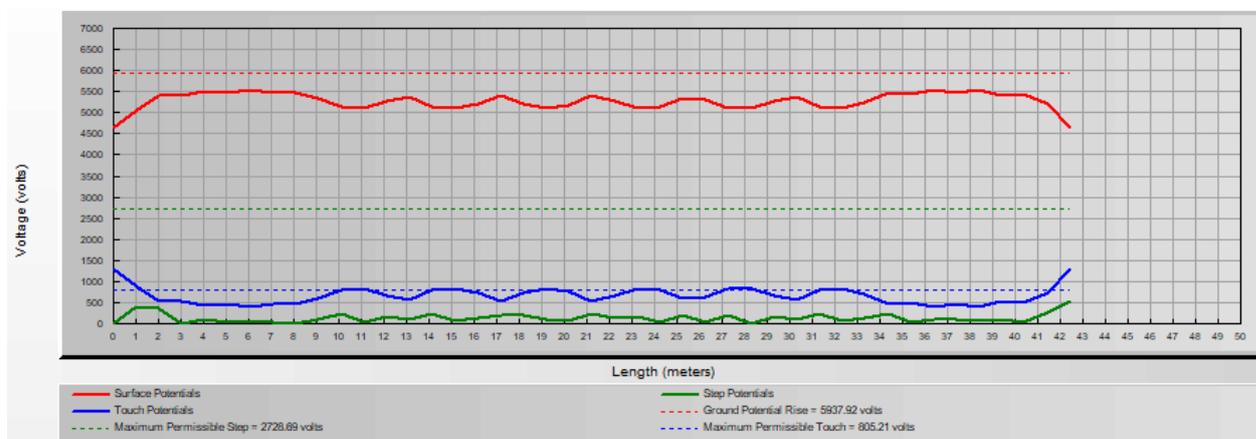
A resistência calculada pelo CYMgrid possui valor de $5,90\Omega$, já a resistência de aterramento calculada através da Equação (4.8) possui valor de $5,79\Omega$. O *software* fornece os valores máximos permitidos para potencial de toque e passo e GPR, como mostra a Figura 41.

O *software* CYMgrid considera que a corrente de falta máxima que percorrerá o aterramento possui valor igual a 1KA. Dessa forma, o valor de GPR, que é dado pela multiplicação da corrente injetada pelo valor da resistência de aterramento possui baixo valor.

Vale ressaltar que a Figura 42 mostra que existem potenciais de toque perigosos nas extremidades da malha de aterramento, o valor máximo permitido é $805,21V$ (visto na Fig 41), porém, atinge $1277,81V$. Recomenda-se que não deve existir nenhuma estrutura metálica ao redor da malha de aterramento, somente dentro dela. Sendo assim, o design para a malha de aterramento atende aos critérios estabelecidos.

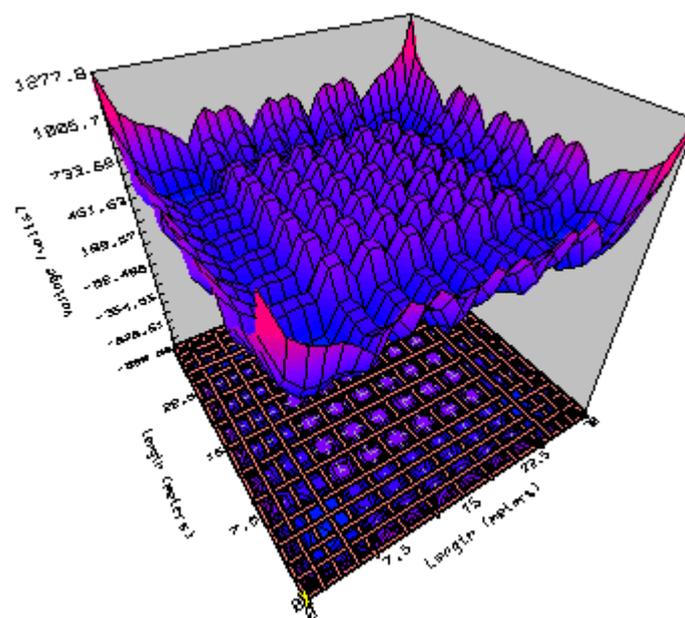
Outra solução possível para diminuir o potencial de toque na malha é adicionar hastes e condutores nas suas bordas, porém, é importante avaliar os custos relacionados a adição do material proporcional ao valor final do potencial alcançado.

Figura 41 – Distribuição de potenciais no solo e elevação de potencial da malha (GPR - Ground Potential Rise).



Fonte: CYMgrid.

Figura 42 – Gradiente de tensão da superfície no solo.



Fonte: CYMgrid.

7 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado, de maneira explicativa, os parâmetros e as diretrizes necessárias para se projetar uma malha de aterramento eficiente, tendo como ponto fundamental o conhecimento da resistividade do solo e sua estratificação.

Os mapas elaborados apresentaram variação de resistividade de solo medida na área estudada. A resistividade do solo varia mais significativamente em pontos adjacentes quando se adota espaçamento menor na medição, em que a corrente flui mais superficialmente e o solo pode apresentar trincas e umidade menor.

Os resultados da estratificação do solo mostram que 73% das amostras foram estratificadas usando o método de duas camadas, o resultado alcançado se mostra bastante eficiente mesmo adotando apenas três espaçamentos diferentes na medição de cada amostra.

O solo estudado em um contexto geral apresentou uma faixa de resistividade medida característica de um solo predominantemente argiloso, fisicamente caracterizado por boa drenagem e grande compactação. No ponto onde foi simulado a malha de terra, esse tipo de solo favoreceu para um valor de resistividade reduzido, tal característica contribuiu para o enquadramento de valores dos potenciais de segurança permitidos.

Apesar das dificuldades encontradas no decorrer do trabalho, como o esforço exaustivo na cravação dos eletrodos de medição em um solo bastante duro limitando a medição em mais distâncias entre eletrodos e a tarefa de aprender a simular malhas de aterramento no *software* CYMgrid, as ferramentas e diretrizes abordadas no trabalho permitiu satisfatório resultado de estratificação e implementação de um projeto de malha de aterramento adequado às exigências previstas em normas.

Como proposta de trabalhos futuros pode-se indicar:

- Aumentar a densidade de amostras estudadas e fazer interpolação utilizando dois métodos distintos para posterior comparação dos mapas.
- Aumentar o número de espaçamentos e linhas de medição das amostras e analisar o resultado da estratificação.

Referências

- BGF CONSULTORIA. 2019. Disponível em: <<https://www.bgfconsultoria.com.br/laudo-aterramento>>. Acesso em: 11 jun. 2019. 5
- BORGES, W. R. Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletrorresistividade. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002. 16
- CAMARGO, E. C. G. et al. Análise Espacial de Superfícies. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos . 2000. 24, 25
- CAPUTO, H. P. *Mecânica dos solos e suas aplicações. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 6ª edição, v. 1.* [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 1989. 3
- CHAVES, C. Aterramento: Fundamento e Aspectos Práticos. 2015. 26
- COELHO, N. F. B. Eléctrodos de Terra. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Porto, Portugal. 2011. 6, 15
- CUNHA, J. G. *Requisitos de Aterramento de Cabine Primária, Segundo a Nova NBR 14039. ENERSHOW. São Paulo, 2003.* [S.l.: s.n.], 2003. 32
- DIAS, A. D. *Malhas de aterramento em subestações energizadas: Medições e Análises. Dissertação.* [S.l.: s.n.], 2011. 32, 33, 34
- DIAS, G. A. D. Aspectos a Considerar no Dimensionamento e Seleção de Equipamentos e Sistemas em Subestações de Alta Tensão, Buscando Eficiência Energética. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC. Porto Alegre. 1996. 31
- ELAT. *GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA (Brasil). INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.* 2019. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/>>. Acesso em: 11 jun. 2019. 1
- FLEURY, N.; GUEDES, L. *Aplicações de Aterramento e Proteção de Sistemas Elétricos. 2ª edição.* [S.l.]: London 7 Editora, 2015. 32
- FLORES, A. J. M. Análise e Aplicação de Métodos para o Cálculo da Resistência de Terra em Sistemas com N Eléctrodos Instalados em Solos Heterogêneos. Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Porto. 2014. 15, 28
- IEEE-80, S. *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York, NY: IEEE Power Engineering Society, Substations Committee, 2000.* [S.l.: s.n.], 2000. 32, 33, 34, 49
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. *Aterramento elétrico. 3ª edição modificada e ampliada.* [S.l.]: Sagra - D.C Luzzatto, 1995. 1, 6, 8, 9, 10, 13, 14, 22, 27, 28, 30

- LANDIM, P. M. B. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. Lab. Geomatémática, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Texto Didático 02. 2000. 25
- LEITE, C. M.; FILHO, M. L. P. Técnicas de aterramentos elétricos: cálculos, projetos e softwares para aterramentos elétricos. 4.ed. São Paulo: Oficina de Mydia. 1996. 12
- LIMA, V. Fundamentos de pedologia. Fundamentos de pedologia Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola. p. 343, 2001. 3
- MAMEDE, J. *Instalações elétricas industriais. 8a edição. ed. [S.l.]*: [S.l.]: GEN-LTC, 2010. 16
- MANSUR, R. K. Estudo Teórico Sobre os Métodos de Medição de Resistência e Resistividade de aterramento. Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 2014. 16, 29
- NBR. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012.* [S.l.: s.n.], 7117:2012. 15, 17, 19, 23, 24, 26, 27
- NBR, A. *Primeiro Projeto de revisão ABNT NBR 7117: Medição de Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo.* [S.l.: s.n.], 7117:2011. 17, 18, 30
- NETO, E. L. S. Características, propriedades e classificação de solos. Universidade do Estado de Mato Grosso. 2006. 2006. 4
- RAGGI, L. M. R. Projeto de Malhas de Aterramento: Contribuição ao Cômputo da Estratificação do Solo. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, - UFMG Belo Horizonte. 2009. 19, 31, 35
- TEIXEIRA, F. G. T. “Modelização de Eléctrodos de Terra em Sistemas Eléctricos de Energia”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, FEUP, Porto. 2000. 9
- THIESEN, S. Aplicação de ferramenta SIG para mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundação a partir de ensaios SPT: um estudo de caso em Blumenau/SC. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis. 2016. 24
- VIANA, F. M. Interpretação da Resistividade Aparente do Solo e Estratificação com Arranjo de Schlumberger. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás. 2016. 20
- VISACRO, S. F. *Aterramentos Elétricos.* [S.l.]: Artliber, 2002. 4, 5, 9, 11, 12, 20, 21